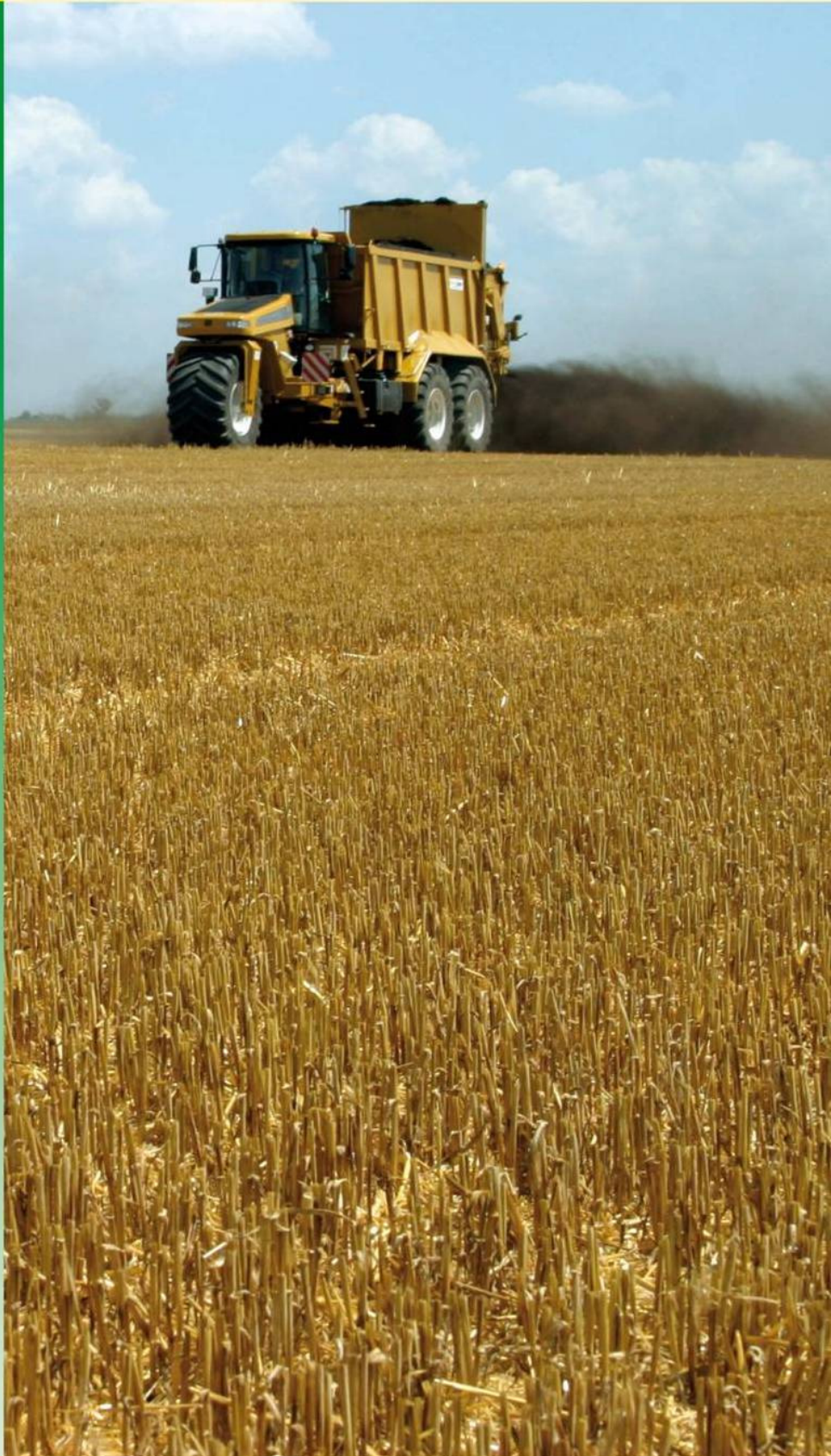




Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft

GRUNDLAGEN
DER GUTEN FACHLICHEN PRAXIS



BGK



Landwirtschaftliches
Technologiezentrum
Augustenberg

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Thema des Abschlussprojektes Kompost-Anwendungsversuche Baden-Württemberg

Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft

Abschlussbericht April 2008

Nachfolgeprojekt des Verbund-Forschungsprojektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Laufzeit 2000 - 2002)

Projektbearbeitung

	Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe, des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg Direktor: Dr. Norbert Haber
---	--

unter Mitarbeit von

	Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Department of Soil Ecology, Halle Wiss. Geschäftsführer: Prof. Georg Teutsch
	Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH, Klein Machnow Leiter: Dr. Jürgen Reinhold

gefördert durch

	Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg
	Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK), Köln sowie Gütegemeinschaften Kompost Region Süd und Region Südost, und Verband der Humus- und Erdenwirtschaft Nord.
	Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e.V. (VHE), Aachen

IMPRESSUM

Herausgeber und Copyright	Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg - LTZ-, Nesslerstraße 23 - 31, 76227 Karlsruhe, Tel. 0721/9468-0, Email: poststelle@ltz.bwl.de Herausgabe: April 2008
Projektleitung	Dr. Norbert Haber, Direktor
Projektförderung	Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg, Stuttgart . Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln. Verband der Humus- und Erdenwirtschaft, Aachen.
Projekt- bearbeitung	Ergebnisauswertung und Gesamtreaktion: Dr. Rainer Kluge, c/o LTZ Augustenberg, Neßlerstraße 23 - 31, 76227 Karlsruhe
Mitarbeit	Teil „Bodenphysikalische Wirkungen“: Punkt C 2.2.2.1 Dr. Berthold Deller, LTZ Augustenberg, Neßlerstraße 23 - 31, 76227 Karlsruhe
	Teil „Bodenbiologische Wirkungen“: Punkt C 2.2.2.2 Dr. Holger Flaig, LTZ Augustenberg, Neßlerstraße 23 - 31, 76227 Karlsruhe
	Teile „Humusreproduktion“ und „Heißwasserlöslicher Kohlenstoff und Stickstoff des Bodens“: Punkte C 2.2.1.2 und C 2.2.1.5 Dr. Elke Schulz, Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ, Department of Soil Ecology, Theodor-Lieser-Strasse 4, 06120 Halle Dr. Jürgen Reinhold, Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH, Stansdorfer Damm 39, 14532 Klein Machnow
Bezug	LTZ Augustenberg, Neßlerstraße 23 - 31, 76227 Karlsruhe, und Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Von-der-Wettern-Straße 25, 51149 Köln, Tel.: 02203/358 37-0, Fax: 02203/358 37-12, Email: info@kompost.de , Internet: www.kompost.de
Preis	Abschlussbericht inkl. CD-ROM zzgl. MwSt. und Versand 20,- €
Nachdruck (auch auszugsweise) nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe gestattet. Foto Titelbild: Volker Max	

Zum Geleit

Die ausreichende Versorgung des Bodens mit organischer Substanz (Humushaushalt) und eine auf die Bodenart und Nutzung ausgerichtete Kalkzufuhr (Basenhaushalt) sind neben der auf den Pflanzenbedarf abgestimmten Nährstoffzufuhr (Düngung) die maßgebenden Voraussetzungen für die langfristige Nutzungsfähigkeit der landwirtschaftlichen Böden bei hohem und sicherem Ertragsniveau. Qualitativ hochwertige, gütegesicherte Komposte können dazu einen wertvollen Beitrag leisten. Die Verwertung solcher Komposte zur Düngung und Bodenverbesserung im Garten- und Landschaftsbau sowie in der Landwirtschaft und zur Rekultivierung von Böden kann inzwischen als Beispiel für nachhaltiges und ökologisch verträgliches Wirtschaften bei gleichzeitiger Schonung begrenzter Ressourcen herangezogen werden.

Im Auftrag des Ministeriums Ländlicher Raum wurden in Baden-Württemberg schon 1995 statische Kompost-Anwendungsversuche mit einer einheitlichen Versuchsplanung unter realen Praxisbedingungen angelegt, um wesentliche Fragen zu den Vorteilswirkungen von Komposten in objektiver Abwägung mit Risiken für den Boden- und Gewässerschutz sowie den Verbraucher möglichst umfassend zu klären. Eine erste Auswertung der Versuche erfolgte im Jahre 2003 auf der Grundlage eines Verbund-Forschungsprojektes „Kompostverwertung in der Landwirtschaft“, das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wurde. Die beteiligten Projektpartner Gütegemeinschaft Kompost Region Süd e.V., Staatliche Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Augustenberg, Institut für Agrarpolitik und landwirtschaftliche Marktlehre der Universität Hohenheim und Fachhochschule Nürtingen, Fachbereich Betriebswirtschaft, haben seinerzeit in einem umfassenden Forschungsbericht alle Aspekte der nachhaltigen Kompostanwendung von den bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Grundlagen über die ökonomischen und ökologische Bewertungen bis hin zu Fragen einer effektiven Kompostvermarktung bearbeitet. Im Ergebnis dieses Berichtes konnten zahlreiche Diskussionen um das Für und Wider der landwirtschaftlichen Kompostverwertung als geklärt betrachtet werden.

Die fünf einheitlich angelegten Kompost-Anwendungsversuche wurden im Jahre 2006 planmäßig beendet. Damit liegen für drei Standorte 12jährige und für zwei Standorte 9jährige Untersuchungsergebnisse vor - eine für bundesdeutsche Verhältnisse einmalige Versuchs- und Ergebnisbasis. In einem Abschlussprojekt wurden die Versuche noch einmal einer gründlichen Untersuchung auf alle pflanzenbaulich und ökologisch relevanten Parameter unterzogen. Besonders Augenmerk wurde dabei neben den Fragen der Humuswirkung, deren Bedeutung zunehmend wichtiger wird, auch einer gründlichen ökologischen Abschlussbewertung gewidmet, die neben den Schwermetallen auch eine Reihe organischer Schadstoffe mit einbezieht. Die Ergebnisse werden im vorliegenden Abschlussbericht vorgestellt, diskutiert und bewertet.

Unser Dank gilt dem Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg, das die langjährige Versuchsdurchführung unterstützt und die aufwändigen abschließenden Untersuchungen ermöglicht hat. Herzlichen Dank sagen wir auch der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., mit deren finanzieller Unterstützung die bodenkundlichen Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Nicht zuletzt geht unser Dank an alle am Abschlussprojekt unmittelbar Beteiligten (vgl. Impressum) sowie die Versuchsbetreuer, die in kollegialer und ko-

operativer Weise maßgeblich dazu beigetragen haben, dass dieser Abschlussberichtes möglichst ganzheitlich und fundiert gestaltet werden konnte.

Möge dieser Abschlussbericht mit seiner umfassenden Datenbasis und seinen Erfahrungen und praxisbezogenen Anwendungsempfehlungen dazu beitragen, die nachhaltige Anwendung gütegesicherter Komposte in der Landwirtschaft sowie im Garten- und Landschaftsbau zu unterstützen und zu optimieren.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'N. Haber', written in a cursive style.

Dr. N. Haber

Direktor

Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
A NACHHALTIGE KOMPOSTANWENDUNG IN DER LANDWIRTSCHAFT - KURZFASSUNG DES PROJEKTBERICHTES	1
A 1 Zielstellung und methodische Konzeption	1
A 2 Pflanzenbauliche Vorteilswirkungen	2
A 2.1 Organische Substanz, Humusreproduktion des Bodens und Bodenverbesserung	3
A 2.2 Zufuhren an Nährstoffen und Kalk und ihre Düngewirksamkeit	7
A 2.2.1 Zufuhren und Düngebilanz	7
A 2.2.2 Düngewirksamkeit der Wertstoffe und Nährstoffe (außer Stickstoff)	8
A 2.2.3 Humusqualität und Anrechenbarkeit von Stickstoff in der Düngebilanz	11
A 2.2.4 Abschlussbewertung	14
A 3 Mögliche Risiken	14
A 3.1 Unerwünschte Stoffe	15
A 3.1.1 Schwermetallsituation	15
A 3.1.2 Organische Schadstoffe	17
A 3.2 Weitere mögliche Risiken	18
A 3.2.1 Abschlussbewertung	21
A 4 Nachhaltige Kompostanwendung - Grundsätze und Anwendungsempfehlungen	21
A 4.1 Grundsätze und Entscheidungsfindung	21
A 4.2 Anwendungsregeln	25
A 5 Nachhaltige Kompostanwendung - Abschlussbewertung	29
B PLANUNG UND ABLAUF DES FORSCHUNGSPROJEKTES	31
B 1 Einleitung und Zielstellung	31
B 2 Konzeption und Arbeitsziele	33
B 3 Material und Methoden	35
B 3.1 Inhaltsstoffe von Komposten	35
B 3.2 Kompost-Anwendungsversuche	35
B 3.2.1 Versuchsstandorte	35
B 3.2.2 Versuchsplanung	37
B 3.2.3 Versuchsdurchführung	39
B 3.2.4 Beteiligte Projektpartner	40
B 3.3 Untersuchungen	40
B 3.3.1 Agrochemische Untersuchungen	40
B 3.3.1.1 Komposte	40
B 3.3.1.2 Böden	40

B 3.3.1.3	Pflanzen	40
B 3.3.2	Bodenphysikalische und -biologische Untersuchungen	41
B 3.3.3	Ergebnisauswertung und -darstellung	41
C	ERGEBNISSE	45
C 1	Übersichtsuntersuchungen zu Inhaltsstoffen von Komposten	45
C 1.1	Wertgebende Inhaltsstoffe	45
C 1.1.1	Gehalte	45
C 1.1.2	Frachten	47
C 1.1.2.1	Organische Substanz und basisch wirksame Substanz (BWS)	47
C 1.1.2.2	Nährstoffe	49
C 1.2	Unerwünschte Stoffe	51
C 1.2.1	Schwermetalle	51
C 1.2.1.1	Gehalte	51
C 1.2.1.2	Frachten	52
C 1.2.2	Organische Schadstoffe	53
C 1.2.3	Fremdstoffe und Steine	54
C 1.2.4	Keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile	55
C 1.3	Mikrobiologische Parameter und Seuchenhygiene	56
C 2	Kompostwirkungen in den Anwendungsversuchen	58
C 2.1	Zuführen	58
C 2.1.1	Wertgebende Inhaltsstoffe	58
C 2.1.1.1	Organische Substanz und basisch wirksame Substanz	58
C 2.1.1.2	Nährstoffe	58
C 2.1.2	Schwermetalle und organische Schadstoffe	61
C 2.2	Wirkungen auf den Boden	62
C 2.2.1	Bodenchemische Wirkungen	62
C 2.2.1.1	pH-Wert	62
C 2.2.1.2	Humusgehalt und Humusreproduktion	64
C 2.2.1.3	N-Gesamtgehalt	68
C 2.2.1.4	N _{min} -Gehalt	71
C 2.2.1.5	Heißwasserlösliche Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte des Bodens und Beschaffenheit der organischen Bodensubstanz	75
C 2.2.1.6	Lösliche Gehalte an Phosphor, Kalium und Magnesium	81
C 2.2.1.7	Schwermetallgehalte	84
C 2.2.1.8	Gehalte an organischen Schadstoffen	88
C 2.2.1.9	Bodendaten des Bodenprofils nach Versuchsende	90
C 2.2.2	Bodenphysikalische und -biologische Wirkungen	96
C 2.2.2.1	Bodenphysikalische Wirkungen	97
C 2.2.2.1.1	Auswirkungen auf die Bodenstruktur	97
C 2.2.2.1.2	Auswirkungen auf den Wasser- und Lufthaushalt des Bodens	99
C 2.2.2.2	Bodenbiologische Wirkungen	101
C 2.2.2.3	Abschließende Bewertung der bodenphysikalischen und -biologischen Wirkungen	104

C 2.3	Wirkungen auf die Ernteprodukte	107
C 2.3.1	Nährstoffgehalte und -entzüge	107
C 2.3.1.1	Nährstoffgehalte	107
C 2.3.1.2	Nährstoffentzüge	108
C 2.3.2	Schwermetallgehalte und -entzüge	109
C 2.3.2.1	Schwermetallgehalte	109
C 2.3.2.2	Schwermetallentzüge	110
C 2.4	Düngewirksamkeit der Nährstoffzufuhren mit Kompostgaben	112
C 2.4.1	Stickstoff	112
C 2.4.2	Übrige Nährstoffe	118
C 2.5	Ertragswirkungen	119
D	LITERATUR	125

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Abbildung 1 Beispiel für die Entwicklung der „pflanzenverfügbaren“ Bodengehalte an Phosphor (links) und Kalium (rechts) in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte gegen Ende der Versuchsdurchführung	11
Abbildung 2 Modell der objektiven Bewertung von Kompostwirkungen in der Landwirtschaft	34
Abbildung 3 Ganzheitlicher Ansatz des Forschungsprojektes	34
Abbildung 4 Kompost-Anwendungsversuche in Baden-Württemberg mit 9jähriger bzw. 12jähriger Laufzeit	36
Abbildung 5 Jährlicher Saldo von Zufuhr an organischer Substanz (OS) durch Kompostgaben und dem Humusbedarf von Böden (Mittelwerte), bezogen auf Kohlenstoff (C)	48
Abbildung 6 Jährlicher Saldo von Kalkzufuhr mit Kompostgaben und Kalkbedarf von Böden (Mittelwerte)	49
Abbildung 7 Jährlicher Saldo von Nährstoffzufuhren durch Kompostgaben und Nährstoff- abfuhr durch Ernteprodukte (Mittelwerte)	50
Abbildung 8 Schwermetallgehalte von Komposten relativ zu Grenzwerten der Bioabfall-Verordnung für Kompostgaben von 20 t/ha TM (oben) bzw. 30 t/ha TM (unten) im 3jährigen Turnus (Grenzwerte in mg/kg TM = 100 %)	52
Abbildung 9 Fremdstoffgehalte >2 mm und Steingehalte >5 mm in Komposten: Ergebnisse der Übersichtsuntersuchungen sowie der Kompostversuche	55
Abbildung 10 Jährliche Zufuhren an organischer Substanz sowie an Kalk (BWS) in der Kompoststufe K2 (= 10 t/ha TM)	59
Abbildung 11 Jährliche Nährstoffzufuhren in kg/ha der Kompoststufe K2 (= 10 t/ha TM)	59
Abbildung 12 Saldo Nährstoffzufuhr mit gestaffelten Kompostgaben (K1, K2, K3)/ Nährstoffabfuhr Haupternteprodukte (Korn, S.Mais) und Stroh: Jährliche Nährstofffrachten in kg/ha	60
Abbildung 13 Schwermetallfrachten der in den Versuchen eingesetzten Komposte relativ: Ausschöpfung der stringenteren Grenzfrachten lt. Bioabfall-Verordnung (= 100 %) für Gaben von 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus	61
Abbildung 14 Entwicklung des pH-Wertes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe:	63
Abbildung 15 Beziehung zwischen Kalkzufuhr der Kompoststufen (jährlich 0, 5, 10 und 20 t/ha TM) im gesamten Versuchsverlauf und pH-Wert des Bodens	64

Abbildung 16	Entwicklung des Humusgehaltes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte nach 9 bzw. 12 Versuchsjahren	65
Abbildung 17	Beziehung zwischen der Zufuhr an organischer Substanz der Kompoststufen (jährlich 0, 5, 10 und 20 t/ha TM) im gesamten Versuchsverlauf und der Zunahme des Humusgehaltes des Bodens	66
Abbildung 18	Entwicklung der N-Gesamtgehalte im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte nach 9 bzw. 12 Versuchsjahren	70
Abbildung 19	Beziehung zwischen der N-Zufuhr der Kompoststufen (jährlich 0, 5, 10 und 20 t/ha TM) insgesamt und der Zunahme des N-Gesamtgehaltes des Bodens	70
Abbildung 20	Änderung der N_{min} -Gehalte mit steigender Kompostgabe (jährlich 5, 10 und 20 t/ha TM) im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost (Stufe K0): Varianten 1, 4, 7 und 10 ohne ergänzende N-Düngung (Stufe N0)	72
Abbildung 21	dito Abbildung 20: Varianten 2, 5, 8 und 11 mit N-Ergänzungsdüngung von 50 % des Optimums (Stufe N1)	72
Abbildung 22	dito Abbildung 20: Varianten 3, 6, 9 und 12 mit voller N-Ergänzungsdüngung (Stufe N2)	73
Abbildung 23	Entwicklung des P_2O_5 -Gehaltes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte nach 6 - 9 bzw. 9 - 12 Versuchsjahren	82
Abbildung 24	Entwicklung des K_2O -Gehaltes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte nach 6 - 9 bzw. 9 - 12 Versuchsjahren	82
Abbildung 25	Entwicklung des Mg-Gehaltes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte nach 6 - 9 bzw. 9 - 12 Versuchsjahren	83
Abbildung 26	Veränderungen der Schwermetall(SM)-Gehalte des Bodens nach 9 bzw. 12jähriger Kompostanwendung	85
Abbildung 27	Vergleich der Fruchtbarkeitsmerkmale im Bodenprofil zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende am Beispielsversuch Stockach:	91
Abbildung 28	Vergleich der Bodendaten im Bodenprofil zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende am Beispielsversuch Stockach:	94
Abbildung 29	Wirkungen der Kompostgaben auf Parameter der Bodenstruktur (Trockenrohdichte - oben, Porenanteil - Mitte, Aggregatstabilität - unten)	98
Abbildung 30	Wirkungen der Kompostgaben auf Parameter des Luft- und Wasserhaushaltes (nutzbare Feldkapazität - oben links, Luftkapazität - oben rechts, Wasserkapazität - unten links, Wassergehalt - unten rechts)	100
Abbildung 31	Wirkungen der Kompostgaben auf bodenbiologische Parameter (mikrobielle Biomasse - oben, N-Mineralisation - Mitte, alkalische Phosphatase - unten)	103
Abbildung 32	Schwermetallentzüge der Ernteprodukte in Relation zur Schwermetallzufuhr durch Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM: Mittel aller Versuche der letzten Fruchtfolgerotation (Zeitraum 2004 - 2006)	111
Abbildung 33	N-Ausnutzung der jährlichen Kompostgaben (N-Mehrentzüge Ernteprodukte in % der N-Zufuhr Komposte) im Verlauf der Fruchtfolgerotationen:	115
Abbildung 34	Vergleich der N-Ausnutzungsraten von K.Mais- bzw. S.Maisfruchtfolgen im Mittel der 2. - 4. Fruchtfolgerotation.	116
Abbildung 35	Erträge in Abhängigkeit von der Kompostgabe und der ergänzenden N-Düngung: Absolutwerte der letzten Fruchtfolge-Rotation 2004 - 2006	121
Abbildung 36	Entwicklung der Erträge in Abhängigkeit von der Kompostgabe und der ergänzenden N-Düngung: Relativwerte der Fruchtfolge-Rotationen 1998-2000, 2001-2003 und 2004-2006	122

VERZEICHNIS DER KÄSTEN

	Seite
Kasten 1	Landwirtschaftliche Kompostanwendung: Grundsätze.....22
Kasten 2	Landwirtschaftliche Kompostanwendung: Entscheidungsfindung Boden23
Kasten 3	Landwirtschaftliche Kompostanwendung: Entscheidungsfindung Kompost25
Kasten 4	Regeln für die nachhaltige Kompostanwendung im landwirtschaftlichen Pflanzenbau: Höhe der Kompostgabe und Anrechnung der Nährstoffzufuhren.....27

TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tabelle 1	Zufuhr an organischer Substanz mit Kompostgaben und Humusbilanz3
Tabelle 2	Bodenverbessernde Wirkungen der Kompostanwendung: Komprimierte Projektergebnisse sowie Erfahrungen aus Literatur und Praktikerbeobachtungen6
Tabelle 3	Jährliche Zufuhren an Nährstoffen und Kalk mit pflanzenbaulich geeigneten Kompostgaben7
Tabelle 4	Wirkungen pflanzenbaulich geeigneter Kompostgaben auf die Humus- und N-Gesamtgehalte sowie den pH-Wert der Böden: Komprimierte Projektergebnisse nach 9 bzw. 12 Versuchsjahren, mittlere Bereiche8
Tabelle 5	Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirksamkeit der Zufuhren an Kernnährstoffen (Phosphor, Kalium, Magnesium) mit regelmäßigen Kompostgaben10
Tabelle 6	Bereiche düngewirksamer N-Anteile aus Komposten zur Anrechnung in der N-Düngebilanz13
Tabelle 7	Schwermetallsituation nach langjähriger pflanzenbaulicher Kompostanwendung: Komprimierte Projektergebnisse16
Tabelle 8	Organische Schadstoffe nach langjähriger pflanzenbaulicher Kompostanwendung: Komprimierte Projektergebnisse18
Tabelle 9	Weitere mögliche Risiken einer langjährigen pflanzenbaulichen Kompostanwendung: Komprimierte Projektergebnisse19
Tabelle 10	Regeln für die nachhaltige Kompostanwendung im landwirtschaftlichen Pflanzenbau: Geeignete Anwendungstermine und verfahrenstechnische Regeln28
Tabelle 11	Standortbeschreibung, eingesetzte Kompostarten und Laufzeit der Versuche37
Tabelle 12	Einheitlicher Versuchsplan der Kompost-Anwendungsversuche38
Tabelle 13	Liste der beteiligten „Tandem-Teams“ der Versuche41
Tabelle 14	Parameter und Untersuchungsmethoden für Komposte42
Tabelle 15	Agrochemische Parameter und Untersuchungsmethoden für Böden43
Tabelle 16	Bodenphysikalische und -biologische Parameter und Methoden44
Tabelle 17	Inhaltsstoffe von Bio- und Grünkomposten (BGK 2007)46
Tabelle 18	Größenordnungen der löslichen Nährstoffanteile von Komposten47
Tabelle 19	Mittlere jährliche Zufuhren an Wert- und Nährstoffen mit Kompostgaben von 20 t/ha TM im 3jährigen Turnus und ihre Bewertung für die Düngebilanz49
Tabelle 20	Gehalte an PCB und PCDD/F in Komposten: Eingesetzte Komposte der Kompost-Anwendungsversuche im Zeitraum 1995 - 200654
Tabelle 21	Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die C_{hwl} -Bodengehalte75
Tabelle 22	Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die N_{hwl} -Bodengehalte76
Tabelle 23	Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf das $C_{\text{hwl}}/N_{\text{hwl}}$ -Verhältnis77

Tabelle 24	Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die Relation C_{ums} in % C_{org}	77
Tabelle 25	Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die Relation N_{ums} in % N_t	78
Tabelle 26	Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die C_{inert} -Bodengehalte	79
Tabelle 27	Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die N_{inert} -Bodengehalte	80
Tabelle 28	Hochrechnung zum Anteil der SM-Entzüge Stroh (Summe von 12 Jahren) zur möglichen Anhebung der SM-Gehalte im Boden	86
Tabelle 29	Organische Schadstoffgehalte in Böden der Versuchsstandorte nach 9 bzw. 12jähriger Kompostanwendung Komprimierte Ergebnisdarstellung und -beurteilung (Einzeldaten vgl. Anhang 1, Tabellen 1-08 bis 5-08, jeweils Punkt 2)	89
Tabelle 30	Vergleich der Fruchtbarkeitsmerkmale im Bodenprofil zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende:	92
Tabelle 31	Schwermetallgehalte im Bodenprofil am Versuchsende nach regelmäßigen Kompostgaben (jährlich 10 bzw. 20 t/ha TM) im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost	95
Tabelle 32	C_{mic}/C_{org} -Verhältnis der Böden (mg C_{mic} /g C_{org}) der drei Versuchsstandorte	104
Tabelle 33	Wirkungen regelmäßiger Kompostgaben auf Bodenstruktur, Wasser- und Lufthaushalt sowie Bodenmikrobiologie	105
Tabelle 34	Mittlere Gehaltsbereiche für „natürliche“ Schwermetallgehalte in mg/kg TM der in den Kompost-Anwendungsversuchen angebauten Fruchtarten	110
Tabelle 35	Abschätzung der düngewirksamen N-Anteile aus Komposten zur realistischen Anrechnung in der N-Düngebilanz	117

Verzeichnis der Abkürzungen

Allgemeine Abkürzungen

a	Jahr	C_{ums}	umsetzbarer organischer Kohlenstoff des Bodens
BGK	Bundes-Gütegemeinschaft Kompost e.V., Köln	DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
bzw.	beziehungsweise	FM	Frischmasse
C/N-Verhältnis	Verhältnis der Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff	GUD	Gesamt - Unkrautdeckungsgrad
$CaCl_2$ -Lösung	Calciumchlorid-Lösung	n.b.	nicht bestimmt
CAL-Lösung	Calcium-Acetat-Lactat-Lösung	N_{hwl}	heißwasserlöslicher Stickstoffgehalt des Bodens
C_{org}	organischer Kohlenstoff-Gesamtgehalt des Bodens	N_{inert}	inert gebundener Stickstoffgehalt des Bodens
C_{mic}/C_{org} -Verhältnis	Verhältnis zwischen mikrobiellem Kohlenstoff und organischem Kohlenstoff im Boden	N_{min}	pflanzenverfügbarer Nitrat-Stickstoff der Bodenschicht 0 - 90 cm in kg/ha N
C_{hwl}	heißwasserlöslicher Kohlenstoffgehalt des Bodens	N_t	Gesamt-Stickstoffgehalt
C_{inert}	umsatzträger organischer Kohlenstoff des Bodens	N_{ums}	umsetzbarer Anteil des Gesamt-Stickstoffgehaltes des Bodens
		o.g.	oben genannte

OS	organische Substanz
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration
SchALVO	Schutzgebiets- und Ausgleichs-Verordnung Baden-Württemberg
SM	Schwermetall(e)
TM	Trockenmasse
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
vgl.	vergleiche
VO	Verordnung

Fruchtarten

K.Mais	Körner-Mais
S.Mais	Silo-Mais
W.Gerste	Winter-Gerste
W.Weizen	Winter-Weizen

Chemische Elemente

N	Stickstoff
C	Kohlenstoff
Mg	Magnesium
P	Phosphor
K	Kalium
Ca	Calcium
B	Bor
Cd	Cadmium
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Fe	Eisen
Mo	Molybdän
Ni	Nickel
Pb	Blei
Zn	Zink
Hg	Quecksilber

Organische Schadstoffe

DDD	Dichlordiphenyldichlorethan
DDE	Dichlordiphenyldichlorethylen
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
HCB	Hexachlorbenzol
HCH	Hexachlorcyclohexan
PCB	Polychlorierte Biphenyle, ausgewählte Kongenere Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine/ -furane
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

Bodenphysikalische Parameter

FK	Feldkapazität
nFK	nutzbare Feldkapazität
LK	Luftkapazität
PA	Porenanteil

Maße und Gewichte

°C	Grad Celsius
%	Prozent
Gew.-%	Gewichtsprozent
Vol.-%	Volumenprozent
t	Tonne
g	Gramm
l	Liter
M	Mol
m	Meter
ha	Hektar

Dezimale Vielfache und Teile von Einheiten

n	Nano	10 ⁻⁹
μ	Mikro	10 ⁻⁶
m	Milli	10 ⁻³

c	Zenti	10^{-2}
d	Dezi	10^{-1}
k	Kilo	10^3
M	Mega	10^6

Kennzeichnungen

<	Wert kleiner als
>	Wert größer als
-	kein Ergebnis bzw. Angabe nicht sinnvoll

A Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft - Kurzfassung des Projektberichtes

A 1 Zielstellung und methodische Konzeption

Die Zielstellung der bundesdeutschen Umweltpolitik, geeignete Bioabfälle vorrangig stofflich zu verwerten, hat unverändert hohe Priorität. Nur durch intensive Anstrengungen, Stoffkreisläufe soweit als möglich zu schließen, kann der zunehmenden Verknappung volkswirtschaftlich wichtiger Wertstoffressourcen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit in Gartenbau und Landwirtschaft wirkungsvoll begegnet werden. Neben der Schonung endlicher Nährstoffreserven, vor allem an Phosphor, geht es heute zunehmend darum, die Humusgehalte der Garten- und Ackerböden durch Zuführen an organischer Substanz auf ausreichend hohem Niveau zu halten, um ihre Nutzungsfähigkeit zur Erzielung hoher und qualitativ hochwertiger Erträge langfristig zu gewährleisten.

Professionell hergestellte Komposte haben sich zunehmend als gut geeignete Ressource erwiesen, um den hohen Bedarf der acker- und gartenbaulich genutzten Böden an organischer Substanz - neben traditionellen Quellen, wie der Dünger tierischer Herkunft oder der Stroh- und Gründüngung - zu decken. Sie werden verstärkt zur Bodenverbesserung und Düngung eingesetzt, vor allem in Betrieben, in denen andere organische Dünger fehlen.

Entscheidend für die landbauliche Verwertung der Komposte ist allerdings, dass die Prinzipien der Nachhaltigkeit zuverlässig eingehalten werden. Das heißt, Komposte müssen einen messbaren Nutzen für die Pflanzenproduktion und/oder die Bodenfruchtbarkeit erbringen (*Nutzenaspekte* bzw. *Vorteilswirkungen*) und gleichzeitig alle Belange des Boden- und Umweltschutzes sowie des Verbraucherschutzes mittel- und langfristig gewährleisten (*Risikoabwägung*).

Unter dieser Prämisse wurden vom Land Baden-Württemberg schon im Jahre 1995 Kompost-Anwendungsversuche angelegt. Ziel war es, in einem ganzheitlichen Projektansatz alle maßgebenden pflanzenbaulichen und ökologischen Aspekte der Kompostverwertung unter realen Praxisbedingungen objektiv und wissenschaftlich fundiert zu prüfen.

Eine erste umfassende Auswertung der Kompostversuche bis zum Jahre 2002 wurde im Rahmen eines DBU-Forschungsprojektes vorgenommen (Abschlussbericht vgl. ANONYM 2003A). Im Jahre 2006 wurden die fünf einheitlich angelegten Kompostversuche beendet. Damit liegen heute für drei Standorte 12jährige und für zwei Standorte 9jährige Untersuchungsergebnisse vor - eine für bundesdeutsche Verhältnisse einmalige Versuchs- und Ergebnisbasis.

Ziel des Abschlussprojektes war es, auf dieser Grundlage eine umfassende Untersuchung und -auswertung der Kompostversuche vorzunehmen, in der alle pflanzenbaulichen, bodenkundlichen und vor allem ökologischen Aspekte der langjährigen Kompostanwendung

abschließend geprüft werden und mit Hilfe der Ergebnisse der zusätzlichen Versuchsjahre die Aussagen und Bewertungen des DBU-Projektberichtes 2003 zu validieren sowie die Anwendungsrichtlinien für den nachhaltigen Komposteinsatz - falls erforderlich - zu modifizieren.

Die **innovative methodische Konzeption** des Projektes bestand darin, die ganzheitliche Prüfung aller Vorteilswirkungen und möglichen Risiken der Kompostanwendung unter *konkreten Bedingungen der praktischen Landwirtschaft* durchzuführen, d.h. auf Flächen von landwirtschaftlichen Betrieben, nach einem *einheitlichen Versuchskonzept* (vgl. Kasten) und unter Verwendung professionell hergestellter, *gütesicherter Komposte* aus der Region. Durch die aktive Einbindung der Landwirte und Kompostierer konnte erreicht werden, dass die wissenschaftlichen Versuchsergebnisse durch Erfahrungen der Praktiker ergänzt und überprüft wurden, um damit eine hohe Praktikabilität der daraus abgeleiteten Anwendungsrichtlinien zu gewährleisten.

Komprimierte Angaben zur Projektdurchführung (Einzelheiten zu Konzeption bzw. Versuchsdurchführung vgl. Abschnitte B 2 bzw. B 3.2):

Versuchsstandorte	Fünf Standorte in Baden-Württemberg: Forchheim - Fo, Weierbach - We, Stockach - St, Ellwangen - El, Heidenheim - He überwiegend auf Praxisflächen (Ausnahme Fo)
Böden	überwiegend mittlere und schwere Böden, außer Standort Fo - leichter Boden
Komposte	gütesicherte Komposte: Bioabfallkomposte (Fo, St, El, He), Grüngutkompost (We)
Versuchsdauer	12 Jahre (Orte Fo, We, St); 9 Jahre (Orte El, He)
Prüffaktoren	- gestaffelte Kompostgaben: ohne (Kontrolle)bzw. jährlich 5, 10, 20 t/ha TM - gestaffelte N-Ergänzungsdüngung: ohne, 50, 100 % des Düngungsoptimums
Versuchsanlage	randomisierte Blockanlage mit 12 Varianten zu je 4 Wiederholungen, insgesamt 48 Versuchsparzellen
Fruchtfolge	einheitlich über alle Versuche: Mais/ W.Weizen/ W.Gerste, dabei K.Mais (Standorte Fo, We), S.Mais (Standorte St, El, He)

In den nachfolgenden Abschnitten A 2, A 3 und A 4 der Kurzfassung werden die Ergebnisse des Abschlussprojektes komprimiert und fokussiert auf ihre praktische Anwendung dargelegt. Zu weitergehenden Auswertungen und Beurteilungen siehe Punkt C Ergebnisse des ausführlichen Projektberichtes sowie die Anhänge 1 und 2.

A 2 Pflanzenbauliche Vorteilswirkungen

Die Ergebnisse der pflanzenbaulichen Bewertung bestätigen und erhärten die schon im DBU-Projektbericht 2003 getroffene Einschätzung, dass sich der Nutzen der landbaulichen Kompostanwendung (Vorteilswirkungen) stets aus der *Summe von Einzelwirkungen* ergibt, die sich letztlich im Ertrag sowie in einer erhöhten Bodenfruchtbarkeit widerspiegeln. Außerdem wurde deutlich, dass sich die Wirkung der Kompostgaben - im Unterschied zur Wirkung der Mineraldünger - in der Regel *langsamer entfaltet* und meist *erst nach mehreren Jahren messbar* ist. Deshalb sind für Zwecke der nachhaltigen Düngung und Bodenverbesserung regelmäßige Kompostgaben über längere Zeiträume (3 - 10 Jahre) unabdingbar.

Mittel- und langfristig haben die „bodenverbessernden“ Wirkungen einer regelmäßigen Kompostanwendung - das haben die langjährigen Feldversuche klar gezeigt -, bedingt durch die beträchtliche Zufuhr an organischer Substanz und die damit verbundene positive Beeinflussung der Humusgehalte des Bodens, in der Regel eine noch größere Bedeutung als die Düngungseffekte. Ungeachtet dessen bilden aber Letztere durch die erheblichen Zufuhren an Nährstoffen und Kalk wertvolle Einsparpotenziale, durch die die Kosten der Pflanzenproduktion gemindert werden können.

A 2.1 Organische Substanz, Humusreproduktion des Bodens und Bodenverbesserung

Von den beträchtlichen Zufuhren an **organischer Substanz** von jährlich etwa 2,4 - 2,8 bzw. 3,6 - 4,0 t/ha TM mit pflanzenbaulich zulässigen Kompostgaben von 20 bzw. 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus werden - begünstigt durch den vergleichsweise hohen Anteil an stabilem, reproduktionswirksamen Kohlenstoff (C) in der organischen Kompostsubstanz¹ - jährlich etwa 0,6 - 0,9 t/ha bzw. 1,0 - 1,3 t/ha Kohlenstoff kurzfristig Humus-reproduktionswirksam (vgl. Tabelle 1). Damit kann der Humusbedarf des Bodens überwiegend gedeckt werden, auch bei suboptimalen Humusgehalten. Der Saldo fällt mindestens ausgeglichen, in der Regel aber positiv aus, d.h. die **Humusbilanz** wird insgesamt positiv beeinflusst (Einzelheiten vgl. Punkt C 1.1.2.1).

Tabelle 1 Zufuhr an organischer Substanz mit Kompostgaben und Humusbilanz des Bodens: Mittlere Bereiche

Jährliche Zufuhren mit Kompost		Kompostgaben in t/ha TM im 3jähr. Turnus	
		20	30
organische Substanz	t/ha TM	2,4 - 2,8	3,6 - 4,0
Kohlenstoff (C)	t/ha	1,3 - 1,7	2,0 - 2,4
dav. C reproduzierbar	t/ha	0,6 - 0,9	1,0 - 1,3
Jährlicher Humusbedarf Boden in t/ha Kohlenstoff		Humusbedarf Boden	
		mittel	hoch
Humusgehalt	optimal	0,2 - 0,4	0,6 - 0,9
	suboptimal	0,4 - 0,6	1,2 - 1,6

Das belegen auch die **Humusgehalte der Böden** (Ackerkrume), die in allen Kompost-Anwendungsversuchen nachhaltig angehoben werden konnten (vgl. Punkt A 2.2 und Tabelle 4). Die steigenden Kompostgaben bewirkten in der Regel weitgehend lineare Zuwächse der Humusgehalte, relativ unabhängig von den ergänzenden N-Gaben. So erbrachten schon relativ niedrige Kompostgaben von jährlich 5 t/ha TM nach 9 bzw. 12 Jahren Versuchsdauer messbare Erhöhungen der Humusgehalte von etwa 0,2 - 0,4 %. Mit Kompostgaben von jährlich 10 t/ha

¹ im Mittel etwa 50 % des C-Gehaltes, vgl. BGK (2005)

TM stiegen die Humusgehalte im Mittel sogar um 0,4 - 0,8 % an. Noch höhere Anstiege von 1,4 - 1,8 % waren bei sehr hohen Kompostgaben von jährlich 20 t/ha TM zu verzeichnen, die allerdings nur für Bodensanierungen (Böden mit extrem niedrigerer Humusversorgung) praktische Bedeutung haben. Die Zunahme der Humusgehalte fiel auf sandigem Boden (Standort Forchheim), bedingt durch die hohe mikrobiologische Aktivität bei vergleichsweise hohen Temperaturen, geringer aus als auf mittleren bis schweren Böden. In der Größenordnung kann nach den vorliegenden Ergebnissen mit einer *Anhebung des Humusgehaltes* im Boden von

0,1 % je 8 - 9 t/ha TM an organischer Kompostsubstanz

gerechnet werden (Einzelheiten vgl. Punkt C 2.2.1.2).

In der Regel beschränkte sich die Förderung der Humusgehalte auf die Ackerkrume. Vereinzelt waren auch in der Bodenschicht 30 - 60 cm Anstiege zu verzeichnen (vgl. Punkt C 2.2.1.9).

Insgesamt ist festzustellen, dass sich abfallrechtlich zulässige und pflanzenbaulich mögliche Kompostgaben von bis zu maximal 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus über den notwendigen Kompostgaben für die einfache Humusreproduktion bewegen. Sie sind damit gut geeignet, wie die Kompost-Anwendungsversuche bestätigt haben, die Humusbilanz des Bodens positiv zu gestalten und seine Humusgehalte zu optimieren. In den Versuchen kam es dabei nicht zu einem erhöhten Abbau von organischem Kohlenstoff im Boden, wie das nach Empfehlungen zur Humusbilanzierung für leichter abbaubare organische Dünger zu erwarten ist. Damit erbrachten die Versuche klare **Hinweise für eine nachhaltige Humusanreicherung im Boden bei regelmäßiger Kompostanwendung** (vgl. Punkt A 2.2.2). Dies unterstreicht, dass der Komposteinsatz angesichts knapper Ressourcen durch seine beträchtlichen Zufuhren an organischer Substanz mit einem relativ hohen Humus-reproduzierbarem Anteil vor allem in Marktfirchbetrieben mit ihrem meist hohen Humusbedarf und insbesondere bei der Rekultivierung stark humusverarmter Böden zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

Der nachhaltig positive Einfluss auf die Humusbilanz des Bodens hat sich - das unterstreichen die Versuchsergebnisse - als die entscheidende Voraussetzung für die **bodenverbessernden Wirkungen** der regelmäßigen Kompostgaben erwiesen (vgl. Punkt C 2.2.2 und Übersichtstabelle 33). Besonders deutlich - und wesentlich ausgeprägter als zum Untersuchungszeitpunkt 2002 (DBU-Projektbericht 2003) - zeigte sich das bei den *bodenbiologischen Parametern* (vgl. Punkt C 2.2.2.2). Aber auch die *bodenphysikalischen Parameter*, insbesondere die des Wasserhaushaltes, haben sich im Versuchszeitraum nachhaltig verbessert (vgl. Punkt C 2.2.2.1).

Die Projektergebnisse der Kompost-Anwendungsversuche und ihre Auswirkungen für die Bodennutzung im Überblick (vgl. Tabelle 2):

Unter den Parametern der **Bodenstruktur** wurde die *Trockenrohdichte* bzw. die *Lagerungsdichte* durch Kompostgaben eindeutig abgesenkt. Umgekehrt nahm mit abnehmender Lagerungsdichte der gesamte *Porenanteil* überwiegend spürbar zu, auf schweren Böden aber seltener. Durch die lockerere Lagerung und die zunehmenden Porenanteile der Böden verbesserten sich Drainage und Durchlüftung der Böden, eine konkrete Vorteilswirkung. Letztlich kann auch die *Luftkapazität* von Böden ansteigen, wenn Porenanteil und Lagerungsdichte verbessert werden. Weniger eindeutig - aber häufiger feststellbar - war eine Zunahme der *Aggregatstabilität* der Böden. Sie ist vorrangig auf mittleren und schweren Böden, kaum jedoch auf leichten san-

digen Böden zu erwarten. Deshalb kann der Komposteinsatz vor allem auf mittleren bis schweren Böden mit ungünstiger Bodenstruktur (Bodenverdichtungen) vorteilhaft wirken, weil sich dadurch die Elastizität und damit die Belastbarkeit positiv beeinflussen lassen. Die Böden werden leichter bearbeitbar, wodurch sich, wie Erfahrungen von Landwirten zeigen, auch der Treibstoffverbrauch vermindern kann. Letztlich ist die verringerte Erosionsneigung auf hängigen Flächen, vorrangig ein Ergebnis steigender Humusgehalte, als eine eindeutige Vorteilswirkung zu bewerten.

Recht eindeutig waren die positiven Wirkungen regelmäßiger Kompostgaben auf den **Wasserhaushalt** des Bodens. In der Regel wurde die *Wasserkapazität* deutlich verbessert. Besonders deutliche und gesicherte Anhebungen der Wasserkapazität waren auf den mittleren und schweren Böden, geringere auf dem sandigen Boden Forchheim zu beobachten. Diese positive Tendenz dokumentiert sich im allgemeinen auch im *Wassergehalt*, wie die Anhebungen von absolut 1 - 2 % nach Kompostanwendung im Vegetationsverlauf 2002 zeigten. Ähnliches gilt für die *nutzbare Feldkapazität* (nFK) - durch den Anstieg des Anteils an Mittel- und Grobporen für den „pflanzenverfügbaren“ Wassergehalt maßgebend -, die bei Komposteinsatz überwiegend positiv beeinflusst wurde. Insgesamt ist der erhöhte verfügbare Wasservorrat des Bodens, wie die drei Parameter belegen, eine der entscheidenden Vorteilswirkungen der Kompostanwendung. Bei länger anhaltender Trockenheit können die Pflanzenbestände dadurch Perioden von Trockenstress besser überstehen, vor allem auf leichten bzw. grundwasserfernen Böden. Eine mögliche Erhöhung der *Wasserdurchlässigkeit* der Böden bei Kompostanwendung konnte bisher aus messtechnischen Gründen² noch nicht belegt werden. Beobachtungen an den Versuchen und auch von praktischen Landwirten belegen aber eine schnellere Abtrocknung der mit Kompost behandelten Böden nach Starkregenereignissen.

Als besonders vorteilhaft ist die deutliche Förderung der maßgebenden Parameter der **Bodenbiologie** nach regelmäßiger Kompostanwendung anzusehen. Anhand der Versuchsergebnisse konnte eindeutig belegt werden, dass landwirtschaftlich genutzte Boden durch regelmäßige Kompostgaben in ihrem Bodenleben nachhaltig aktiviert und verbessert werden können, insbesondere durch die Förderung der Umsetzungsprozesse im Boden (Mineralisation der organischen Substanz, Freisetzung von düngewirksamen Nährstoffen) - ein Ergebnis, das inzwischen durch zahlreiche Feldbeobachtungen von praktischen Landwirten bestätigt wurde.

Die Anteile an *mikrobieller Biomasse*, die *N-Mineralisation* und die *Phosphatase-Aktivität* wurden im Versuchsverlauf durchweg hoch signifikant verbessert. Dabei fiel die Ausprägung der Kompostwirkung bei mikrobieller Biomasse und N-Mineralisation stärker aus als im Jahre 2002, ein Indiz für die nachhaltige Wirkung langjähriger Kompostgaben. Von praktischer Bedeutung ist die gesicherte Feststellung, dass die N-Mineralisation des Bodens nach Kompostanwendung stärker steigt, als es die leicht zunehmenden N-Gesamtgehalte erwarten lassen.

Das N-Mineralisierungsgleichgewicht im Boden wird offenkundig nach mehrjähriger Kompostanwendung - wie auch die dann höheren N-Ausnutzungsraten belegen - durch die Aktivierung des Bodenlebens verstärkt in Richtung löslicher und damit düngewirksamer N-Anteile verschoben. Die anfangs geringe düngewirksame N-Fracht (vgl. Punkt A 2.2) steigt demnach mit zunehmender Anwendungsdauer an. Vorteilhaft ist auch die gesicherte Zunahme der Phosphatase-Aktivität des Bodens. Dadurch wird die Mineralisierung organisch gebundener Phosphoranteile der Kompostgaben gefördert. Das ist ein weiterer Beleg

² Sehr große Streuung der Einzelwerte, so dass keine gesicherten Tendenzen ableitbar waren.

für die vergleichsweise hohe Düngewirksamkeit der P-Gesamtzufuhren mit Kompostgaben, die nach den Untersuchungen zur P-Ausnutzung (vgl. Punkt C 2.4.2) in der Düngebilanz voll angerechnet werden können.

Nicht zuletzt kann auch das *phytosanitäre Potenzial des Bodens*, seine Widerstandsfähigkeit gegen Schadorganismen, verbessert werden. Das kann sich, wie in den Versuchen beobachtet wurde, z.B. positiv auf die Unterdrückung von Fusarien bei W.Weizen auswirken, indem infektiöse Erntereste zügiger abgebaut werden. Die Erfahrungen aus den langjährigen Kompost-Anwendungsversuchen erhärten damit den Gesamteindruck, dass der Förderung der Bodenbiologie ein wesentlicher Anteil an der allmählichen Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit als Folge regelmäßiger Kompostgaben zukommt.

Tabelle 2 Bodenverbessernde Wirkungen der Kompostanwendung: Komprimierte Projektergebnisse sowie Erfahrungen aus Literatur und Praktikerbeobachtungen

Parameter	Tendenz	Auswirkungen für die Bodennutzung
Bodenstruktur		
Aggregatstabilität	steigend	Vorrangig auf mittleren und schweren Böden: Boden elastischer, mechanisch belastbarer, besserer Schutz gegen Bodenverdichtungen und Erosion
Porenanteil	deutlich steigend	Anhebung des Anteils an Mittel- und Grobporen, bessere Durchlüftung und Drainage, besserer Gasaustausch
Luftkapazität	steigend	
Lagerungsdichte	deutlich abnehmend	Bodenlockerung, Voraussetzung für bessere Durchlüftung und Drainage
Wasserhaushalt		
Nutzbare Feldkapazität	deutlich verbessert	erhöhte Kapazität zur Wasserspeicherung, erhöhter Wasservorrat bei Trockenheit, verstärkter Schutz der Pflanzenbestände gegen Trockenstress
Wassergehalt		
Wasserkapazität		
Wasserinfiltration	steigend (unsicher)	bessere Wasserdurchleitung bei Starkniederschlägen, Verhinderung von Staunässe, schnellere Abtrocknung Bodenoberfläche
Bodenmikrobiologie		
Mikrobielle Biomasse	deutlich verbessert	nachhaltige Aktivierung des Bodenlebens, verstärkte Mineralisierung der organischen Substanz, dadurch erhöhte Nährstofffreisetzung (vor allem N und P), Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen Schadorganismen und auch gegen physikalische Bodenbelastungen Insgesamt: allmähliche Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit
Phosphataseaktivität		
N-Mineralisierung		

A 2.2 Zufuhren an Nährstoffen und Kalk und ihre Düngewirksamkeit

A 2.2.1 Zufuhren und Düngebilanz

Die mittleren **Nährstoffzufuhren** fallen bei pflanzenbaulich zulässigen Kompostgaben von 20 bis maximal 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus erheblich aus (vgl. Tabelle 3). Bei Berücksichtigung mittlerer bis hoher Nährstoffabfuhr mit den Ernteprodukten sind die Größenordnungen der - für die Düngebilanz wesentlichen - **mittleren Nährstoffsalden** wie folgt einzuschätzen:

- Stickstoff: bei mittlerer Kompostgabe schwach negativ bis ausgeglichen, bei hoher Gabe ausgeglichen bis schwach positiv, bei hohen Entzügen ausgeglichen, große Schwankungen möglich.
- Phosphor: im Mittel meist ausgeglichen.
- Kalium: bei mittleren Entzügen deutlich positiv, bei hohen Entzügen negativ, große Schwankungen möglich.
- Magnesium: stets deutlich positiv.

Die Saldierung der Nährstoffe zeigt aber auch, dass mit moderaten und vor allem maximal möglichen Kompostgaben bei allen Nährstoffen Grenzen erreicht (N, P) und im ungünstigen Fall (K geringe Entzüge, deutlich Mg) überschritten werden können, die im Sinne einer ausgeglichenen Düngebilanz grundsätzlich eingehalten werden müssen (Dünge-Verordnung), um im Interesse des Boden- und Gewässerschutzes mittelfristig ausgeglichene Nährstoffsalden zu gewährleisten (Einzelheiten vgl. Punkte C 1.1.2.2 und C 2.1.1.2).

Tabelle 3 Jährliche Zufuhren an Nährstoffen und Kalk mit pflanzenbaulich geeigneten Kompostgaben

Zufuhren <u>jährlich</u>	Kompostgabe (t/ha TM) im 3jährigen Turnus		Beurteilung
	20 - mittel	30 - hoch	
Nährstoffe in kg/ha	Mittlere Bereiche		Nährstoffsaldo im Mittel
Stickstoff - N	80 - 110	120 - 160	schwach negativ (mittlere Gabe) bzw. ausgeglichen bis schwach positiv (hohe Gabe), hohe Entzüge: ausgeglichen
Phosphor - P ₂ O ₅	35 - 55	60 - 80	überwiegend ausgeglichen
Kalium - K ₂ O	60 - 85	100 - 120	Entzüge mittel: positiv Entzüge hoch: schwach negativ bis ausgeglichen
Magnesium - MgO	35 - 60	60 - 85	stets stark positiv
Wertstoff in dt/ha	Mittlere Bereiche		Bilanz im Mittel
Kalk - CaO	2,0 - 4,0	3,0 - 5,5	positiv für Kalkbilanz, Erhaltungskalkung

Auch die **Zufuhr an basisch wirksamer Substanz** mit Kompost ist beträchtlich. Mittlere Gaben von 20 t/ha TM im 3jährigen Turnus können per Saldo den Kalkverlust auf leichten Böden, hohe Gaben von 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus auf jeden Fall den Kalkbedarf mittlerer bis schwerer Böden decken, sofern deren pH-Werte nicht in suboptimale Bereiche abgesunken sind. Die Kalkzufuhren haben damit die Größenordnung einer *Erhaltungskalkung*. Für die Sanierung versauerter Böden reichen diese Zufuhren allerdings nicht aus (Einzelheiten vgl. Punkte C 1.1.2.1 und C 2.1.1.1).

A 2.2.2 Düngewirksamkeit der Wertstoffe und Nährstoffe (außer Stickstoff)

Maßgebend für die Bewertung in der Düngebilanz ist neben den Zufuhren letztlich die **Düngewirksamkeit** der Nährstoffe und Wertstoffe. Hierzu sind zum einen Veränderungen der *Humus- und N-Gesamtgehalte* sowie die *pH-Beeinflussung* (Kalk) im Boden (vgl. Tabelle 4), bei den Nährstoffen (Phosphor, Kalium, Magnesium) aber vorrangig der Einfluss auf die *löslichen, d.h. pflanzenverfügbaren Bodengehalte*, die für die Düngewirkung entscheidend sind, zu beurteilen (vgl. Tabelle 5). Der *Spezialfall „düngewirksamer N-Anteil“* der N-Gesamtzufuhr mit Kompostgaben, der sich aus den besonderen Bedingungen der N-Mineralisierung der organischen Substanz ergibt, bedarf dabei einer eigenständigen Bewertung (vgl. Punkt A 2.2.3).

Tabelle 4 Wirkungen pflanzenbaulich geeigneter Kompostgaben auf die Humus- und N-Gesamtgehalte sowie den pH-Wert der Böden: Komprimierte Projektergebnisse nach 9 bzw. 12 Versuchsjahren, mittlere Bereiche

Merkmale		Humusgehalt %	N-Gesamtgehalt %	pH-Wert
Anhebung bei jährlichen Kompostgaben (t/ha TM)	5	0,2 - 0,4	0,02 - 0,03	0,1 - 0,3
	10	0,4 - 0,8	0,04 - 0,05	0,3 - 0,6
	20	1,4 - 1,8	0,07 - 0,10	0,6 - 0,8
Anhebungsrate		0,1 % je 8 - 9 t/ha TM an org. Kompostsubstanz	0,01 % je 500 kg/ha N aus Kompost	0,1 pH-Einheiten je 10 dt/ha CaO aus Kompost
Bewertung		Reproduktion der org. Substanz gesichert	N-Gesamtpool allmählich steigend	Größenordnung Erhaltungskalkung

Humus und Humusqualität des Bodens

Zu den eindeutigen Wirkungen regelmäßiger Kompostgaben auf die *Humusgehalte* des Bodens ist unter Punkt A 2.1 ausführlich berichtet worden. Schon mittlere Gaben von 15 - 20 t/ha TM im 3jährigen Turnus reichen nach den Versuchsergebnissen aus, die Humusbilanz positiv zu gestalten.

Ähnlich wie die *Humusgehalte* (Kohlenstoff-Gesamtgehalte - C_{org}) des Bodens nahmen in den Kompost-Anwendungsversuchen mit steigender Kompostgabe auch die *heißwasserlöslichen Kohlenstoffgehalte* (C_{hwl}) allgemein zu, besonders auf biologisch aktiven Böden (vgl. Punkt C 2.2.1.5) - Ausdruck für eine zunehmende Mobilisierung der zugeführten organischen Substanz.

Der *umsetzbare Anteil der Kohlenstoff-Gesamtgehalte* (C_{ums}) zeigte dabei gegenläufige Entwicklungen in Abhängigkeit von der Kompostqualität: Während er bei einem nährstoffarmen und abbaustabilen Grüngut-Fertigkompost relativ zurückging, nahm er bei einem weniger abbaustabilen Bioabfall-Frischkompost deutlich zu. Dagegen stiegen die Gehalte an *inertem, umsatzträgen organischen Kohlenstoff* (C_{inert}) mit steigender Kompostzufuhr in allen Versuchen an, besonders deutlich bei Anwendung von Fertigkomposten auf mittleren und schweren Böden. Dieses gesicherte Projektergebnis ist ein klarer Hinweis dafür, dass bei regelmäßigem Komposteinsatz **eine nachhaltige Humusanreicherung im Boden** stattfindet, auch wenn das Niveau einer ausgeglichenen Humusbilanz überschritten ist³.

Stickstoff, Kalk und Kernnährstoffe

Auch die *N-Gesamtgehalte* des Bodens nahmen im Versuchsverlauf zwar allmählich, aber messbar zu (Einzelheiten vgl. Punkt C 2.2.1.3). Der N-Gesamtpool des Bodens (in Abhängigkeit von der Bodenart etwa 3.000 - 6.000 kg/ha N) wird dadurch mittelfristig positiv beeinflusst. Die ermittelte Anhebungsrate von

etwa 0,01 % je 500 kg/ha N aus Kompostgaben

kommt dabei der rechnerischen Rate von 0,01 % je 350 kg/ha N recht nahe. Da nur relativ geringe Anteile der N-Zufuhr mit den Kompostgaben düngewirksam werden (vgl. Tabelle 6), ist die Zunahme des N-Pools kritisch zu beobachten, um zu hohe N-Positivsalden im Interesse des Boden- und Gewässerschutzes zuverlässig zu vermeiden.

Die Bewertung der Kalkzufuhr mit regelmäßigen Kompostgaben als *Erhaltungskalkung* (vgl. Tabelle 3) wird durch Entwicklung der *pH-Werte* des Bodens in den Versuchen bestätigt. Sie blieben mittelfristig mindestens stabil bzw. stiegen in der Regel sogar langsam an (Einzelheiten vgl. Punkt C 2.2.1.1). In der Größenordnung ergab sich eine Anhebungsrate von

etwa 0,1 pH-Einheiten je 10 dt/ha CaO aus Kompostgaben.

Auch in tieferen Bodenschichten war nach Versuchsende eine pH-stabilisierende Wirkung der Kompostgaben zu beobachten (vgl. Punkt C 2.2.1.9). Pflanzenbaulich geeignete Kompostgaben von 20 - 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus sind damit durchaus geeignet, die Kalkbilanz des Bodens positiv zu beeinflussen. Eine Kalkzehrung infolge regelmäßiger Kompostanwendung, die zu einem allmählichen Rückgang des pH-Wertes führen könnte, wie häufig geäußerte Vermutungen postulieren, ist nach diesen langjährigen Versuchsergebnissen ausgeschlossen. Die erhebliche Kalkzufuhr bei überhöhten Kompostgaben von 60 t/ha TM im 3jährigen Turnus kann, wie die deutliche pH-Wirkung der Versuche zeigt, sogar bei Sanierungsmaßnahmen für versauerte und degradierte Böden (z.B. Kippenböden) von Interesse sein.

Unter den **Kernnährstoffen** hat die Zufuhr an Phosphor und Kalium mit Kompostgaben die entscheidende Bedeutung für die Düngewirkung. Bei beiden Nährstoffen sanken die *löslichen, „pflanzenverfügbaren“* Gehalte des Bodens im Versuchsverlauf ohne eine regelmäßige Grunddüngung, bedingt durch Ernteentzüge und Auswaschung (vor allem bei Kalium), deutlich ab (vgl. Abbildung 1). Mit regelmäßigen Kompostgaben von jährlich 5 t/ha TM konnten diese

³ Lt. VDLUFA-Standpunkt „Humusbilanzierung“ (vgl. Punkt C 2.2.1.5) ist davon auszugehen, dass oberhalb eines ausgeglichenen Humussaldos keine dauerhafte Anhebung der C_{inert} -Bodengehalte zu erwarten ist. Für die Kompostanwendung trifft das offenkundig nicht zu.

Tabelle 5 Pflanzenverfügbarkeit und Düngewirksamkeit der Zufuhren an Kernnährstoffen (Phosphor, Kalium, Magnesium) mit regelmäßigen Kompostgaben

Bewertungsmerkmale	Kernnährstoffe		
	Phosphor	Kalium	Magnesium
Pflanzenverfügbarkeit	hoch		mäßig
Lösliche Bodengehalte ohne Zufuhr	absinkend	stark absinkend	gering absinkend
Lösliche Bodengehalte stabil bei Kompostgaben	20 - 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus		geringe Reaktion auf Kompostgaben
Düngeneffizienz Kompost	hoch	hoch	gering
Anrechnung in der Düngebilanz	volle Anrechnung, dadurch in der Regel begrenzender Faktor der Kompostgabe !		mittelfristig

Gehaltsminderungen teilweise, durch Gaben von jährlich 10 t/ha TM im Mittel vollständig kompensiert werden. Bei sehr hohen Kompostgaben von jährlich 20 t/ha TM waren sogar steigende Bodengehalte festzustellen.

Beide Nährstoffe sind deshalb bei Kompostanwendung gut pflanzenverfügbar und verfügen über eine hohe Düngeneffizienz (vgl. Tabelle 5). Mit regelmäßigen Kompostgaben in pflanzenbaulich optimaler Höhe (20 - 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus) kann - das belegen die Versuche eindeutig - die Versorgung der Böden mit diesen essenziellen Nährstoffen stabil gehalten, d.h. ein Absinken der pflanzenverfügbaren Gehalte verhindert werden. Sie sind in der Düngebilanz voll wirksam anzurechnen. Dadurch können diese Zufuhren den *begrenzenden Faktor der Kompostanwendung* bilden, wenn sich z.B. das Niveau der pflanzenverfügbaren Bodengehalte schon im hohen Versorgungsbereich bewegt (Stufen D - hoch und E - sehr hoch), in dem eine weitere Zufuhr, ausgehend von den Vorgaben der Dünge-Verordnung, nicht zulässig ist.

Im Unterschied dazu ist die Pflanzenverfügbarkeit und die Wirkung der Kompostgaben auf die *löslichen Magnesiumgehalte* des Bodens als relativ gering einzustufen. Leichte Anhebungen waren gegen Versuchsende auf allen Standorten zu verzeichnen. Trotz der gering einzustufenen Düngeneffizienz ist der hohe Positivsaldo an Magnesium (vgl. Tabelle 3) nicht als Nachteil, sondern unter den Gesichtspunkten, dass er der permanenten Mg-Auswaschung aus dem Boden entgegenwirkt und der lösliche Mg-Anteil im Boden keinesfalls phytotoxische Grenzen erreichen kann, durchaus als Vorteil einzustufen. (Einzelheiten zu den löslichen Kernnährstoffen vgl. Punkt C 2.2.1.6).

Die deutliche Anhebung der löslichen Phosphorgehalte in der Ackerkrume setzte sich abgeschwächt auch in der Bodenschicht 30 - 60 cm fort. In der Schicht 60 - 90 cm war ein Komposteinfluss kaum mehr feststellbar. Auf Kalium und Magnesium treffen diese Aussagen kaum zu, d.h. in tieferen Bodenschichten war keine messbare Kompostwirkung zu beobachten. Insgesamt ergibt sich damit als wesentliche Aussage für den nachhaltigen Bodenschutz, dass bei einer *pflanzenbaulich angemessenen Kompostanwendung*, d.h. bei Gaben von 20 - 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus, keine Risiken für eine Minderung der Bodenfruchtbarkeit bzw. für den Bo-

den- und Gewässerschutz, z.B. durch unerwünschte Ein- und Auswaschung von Nährstoffen in tiefere Bodenschichten bzw. in das Grundwasser, bestehen (vgl. auch Punkt C 2.2.1.9).

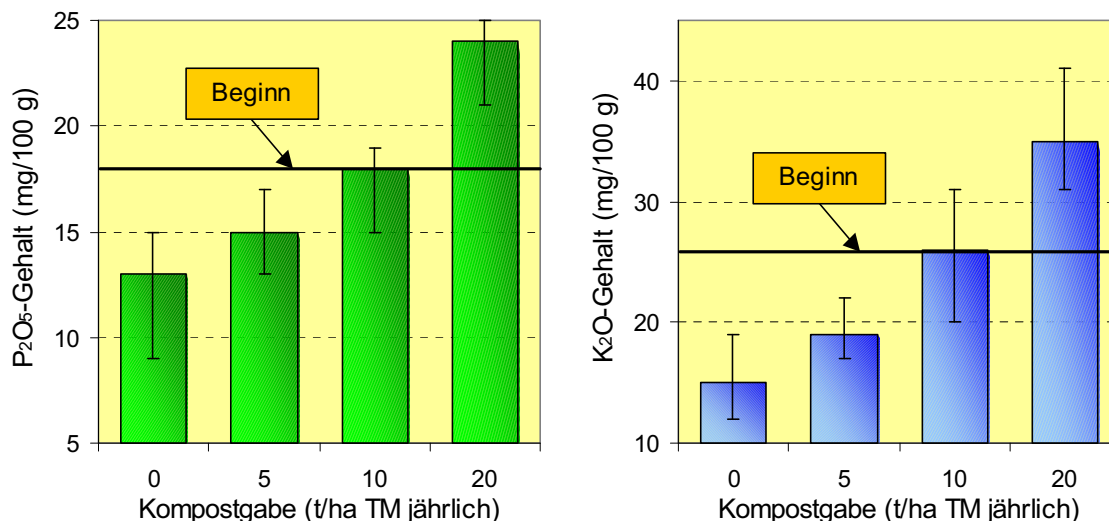


Abbildung 1 Beispiel für die Entwicklung der „pflanzenverfügbaren“ Bodengehalte an Phosphor (links) und Kalium (rechts) in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte gegen Ende der Versuchsdurchführung⁴

Balken - Mittelwerte der Kompoststufen in den Jahren 2004 - 2006
Spannweiten - 25. bzw. 75. Quantil der Einzelwerte
Beginn - Gehalte zu Versuchsbeginn
(Orte Fo, We, St: 1995 - 1997, Orte El, He: 1998 - 2000)

Abschließend ist festzustellen, dass die düngewirksamen Nährstoffzufuhren der pflanzenbaulich geeigneten Kompostgaben erhebliche und wertvolle **Einsparpotenziale** für den Landwirt darstellen. So kann die Phosphor- und Kaliumzufuhr eine *Grunddüngung* ersetzen. Die Kalkzufuhr entspricht einer *Erhaltungskalkung*.

A 2.2.3 Humusqualität und Anrechenbarkeit von Stickstoff in der Düngebilanz

Im Unterschied zu den Kernnährstoffen Phosphor und Kalium ist - wie die Versuche im Einklang mit Beobachtungen der Landwirte belegen - bei der Kompostanwendung nur mit mäßigen Beiträgen der relativ hohen Stickstoff(N)-Gesamtzufuhr zur N-Düngebilanz zu rechnen. Das liegt an der relativ festen Bindung von Stickstoff in der organischen Substanz, die sich auch in den *geringen löslichen N-Anteilen* von im Mittel nur 3 - 5 % der N-Gesamtgehalte von Komposten widerspiegelt (vgl. Einzelergebnisse Punkt C 1.1.1 und Tabelle 18). Deshalb hängt die Düngewirksamkeit der N-Zufuhr mit den Kompostgaben entscheidend von den speziellen Bedingungen der N-Mineralisierung der organischen Substanz ab, die neben der Mineralisierbarkeit (leicht/ schwer abbaubare organische Kompostsubstanz) von weiteren Faktoren, vor allem von der mikrobiellen Aktivität des Bodens, den klimatischen Bedingungen sowie von der

⁴ Orte Forchheim - Fo, Weierbach - We und Stockach - St: nach 9 - 12 Versuchsjahren,
Orte Ellwangen - El und Heidenheim - He: nach 6 - 9 Versuchsjahren.

angebauten Fruchtart und der dadurch bedingten Länge der Vegetationsperiode beeinflusst werden können.

Umfassende Auswertungen zur Veränderung der **Humusqualität** des Bodens durch die Kompostanwendung haben dazu aufschlussreiche neue Erkenntnisse erbracht (vgl. Punkt C 2.2.1.5):

Der *heißwasserlösliche Stickstoffgehalt* des Bodens (N_{hwl}) stieg in allen Versuchen mit steigenden Kompostgaben analog dem heißwasserlöslichen Kohlenstoffgehalt (C_{hwl}) an, besonders deutlich in den Versuchen mit S.Mais-Fruchtfolge. Dabei wurde der *umsetzbare Anteil des Gesamtstickstoffs* im Boden (N_{ums}) durch die Kompostgaben wesentlich deutlicher beeinflusst als der umsetzbare Anteil des organischen Kohlenstoffs (C_{ums}). Die umsetzbaren Stickstoffanteile, die die Größenordnung des potenziell mineralisierbaren N-Gesamtgehaltes im Boden repräsentieren, erreichten in den Versuchen mit S.Mais-Fruchtfolge Werte von 30 - 40 % des Gesamtstickstoffs im Boden, in den Versuchen mit K.Mais-Fruchtfolge sogar Werte deutlich über 50 %. Hohe Kompostgaben hatten dabei offenkundig eine ausgleichende Wirkung auf das Stickstoff-Freisetzungsverhalten der Böden: Während auf Böden mit geringeren N_{ums} -Anteilen am Gesamtstickstoff gesicherte Anstiege der N_{ums} -Werte festzustellen waren, gingen die N_{ums} -Anteile bei hohen Ausgangswerten mit steigender Kompostzufuhr zurück. Der *inerte Anteil des Gesamtstickstoffs* im Boden (N_{inert}), der längere Zeit im Boden verbleibt, ohne wesentlich in die bodeninternen Stoffumsätze einbezogen zu werden, wurde durch alle eingesetzten Komposte statistisch gesichert angehoben, besonders deutlich durch Fertigkomposte. Dieses Ergebnis erklärt und unterstreicht die auf der Grundlage der N-Ernteentzüge gewonnene Einschätzung, dass bei regelmäßiger Kompostanwendung *nur mit relativ geringen Düngbeiträgen der N-Gesamtzufuhr* gerechnet werden kann.

Aus den langfristigen Versuche liegen inzwischen umfangreiche Ergebnisse vor, die - über mehrere Fruchtfolgerotationen hinweg unter unterschiedlichen Boden- und Klimabedingungen gewonnen - eine differenzierte und praxisbezogene Beurteilung der **N-Ausnutzung** von Kompostgaben ermöglichen. Ausgehend davon sollten die *düngewirksamen N-Anteile der N-Gesamtzufuhr mit Kompostgaben* für praktische Verhältnisse, d.h. mit einer *regulären N-Ergänzungsdüngung*, wie folgt in der N-Düngebilanz angerechnet werden (vgl. Tabelle 6, Einzelheiten vgl. Punkt C 2.4.1):

Kurzfristig, d.h. nach *erstmaliger* Kompostanwendung und für Zeiträume von bis zu drei Jahren sind im Mittel jährlich nur 3 bis maximal 5 % der N-Zufuhr düngewirksam anrechenbar. Diese geringe Rate bedeutet praktisch, dass die ergänzende N-Düngung nach „guter fachlicher Praxis“ ohne Abstriche zu geben ist. Unter günstigen Bedingungen (hohe lösliche N-Anteile im Kompost, hohe N-Entzüge der Pflanzen) kann die N-Ausnutzungsraten auch bis auf jährlich 10 % ansteigen. Sie ist dann durch eine entsprechende Senkung der regulären N-Ergänzungsdüngung zu berücksichtigen. Unter ungünstigen Bedingungen, vor allem bei holzreichen Grünkomposten (Frischkomposten), kann es dagegen zu einer zeitweiligen N-Immobilisierung kommen, der durch entsprechende Zuschläge bei der N-Düngung zu begegnen ist.

Mittelfristig sind bei *regelmäßigem* Komposteinsatz ab dem 4. Jahr bis zum 12. Jahr (2. Fruchtfolgerotation und aufwärts) höhere N-Ausnutzungsraten von jährlich 5 - 12 % düngewirksam anrechenbar. Das heißt, im 3jährigen Turnus werden im Mittel

etwa 20 - 35 % der N-Zufuhr einer Kompostgabe düngewirksam (!).

Unter sehr günstigen Voraussetzungen, z.B. bei entzugsstarken Fruchtarten (Gemüsearten, S.Mais u.ä.), umsatzstarken Standorten sowie Komposten mit hohen N-Zufuhren und guter N-Verfügbarkeit (z.B. durchgerottete Biokomposte), sind maximale Raten von jährlich 15 - 20 % der jeweils letzten Gabe möglich. Diese hohen jährlichen Raten sind unbedingt in der N-Düngebilanz zu veranschlagen, d.h. die reguläre N-Düngung ist entsprechend zu reduzieren, damit keine überhöhten löslichen N-Anteile im Boden auftreten. In Fällen geringer N-Mineralisierung, also bei Grün- und Frischkomposten, sind jedoch nicht mehr als jährlich 5 % der N-Zufuhr anzurechnen, um eine unzureichende N-Versorgung der Pflanzen infolge einer möglichen N-Immobilisierung und im ungünstigen Fall dadurch bedingte Ertragseinbußen zu vermeiden.

Tabelle 6 Bereiche düngewirksamer N-Anteile aus Komposten zur Anrechnung in der N-Düngebilanz

Gültig für Kompostgaben von 20 bis maximal 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus

Jährliche N-Gesamtzufuhr absolut (kg/ha)				
	Mittel	90	-	130
	Spannweite	50	-	180
Jährlich anrechenbarer N-Anteil in der Düngebilanz (% N-Gesamtzufuhr)				
- kurzfristig (1 - 3 Jahre)	Mittel	0	-	3
	Spannweite	-5	-	10
- mittelfristig (4 - 12 Jahre)	Mittel	5	-	12
	Spannweite	0	-	20

Anrechenbarer N-Anteil in der N-Düngebilanz (Erläuterung):

Untere Werte:

- Komposte mit niedrigem löslichen N-Anteil (Regelfall Grünkomposte, Frischkomposte)
- Fruchtfolgen mit geringen/mittleren N-Entzügen (z.B. Getreidearten)

Obere Werte:

- Komposte mit hohem löslichen N-Anteil (Regelfall Biokomposte, Fertigkomposte)
- Fruchtfolgen mit hohen N-Entzügen bzw. langer Vegetationszeit (z.B. S.Mais)

Die Versuche haben klar gezeigt, dass bei regelmäßigem Komposteinsatz mit zunehmender Anwendungsdauer eine verstärkte N-Mineralisierung aus der organischen Komposts substanz eintritt. Sie ist das Ergebnis des Zusammenwirkens mehrerer Faktoren, wie der Humusanreicherung und der wachsenden mikrobiologischen Belebung des Bodens, die - zudem gefördert durch die ergänzende N-Düngung - das *Mineralisierungsgleichgewicht allmählich in Richtung höherer löslicher N-Anteile* verschiebt.

Die ergänzende N-Düngung kann präzisiert werden, indem zusätzlich zur N-Ausnutzungsquote der Kompostgaben auch die mögliche Anhebung der $N_{\min}$ -Gehalte im Boden *als Folge der Kompostapplikation* quantitativ berücksichtigt wird. In der Regel erfolgt das bei der N-Düngungsplanung anhand von regionalen oder speziell für den Standort ermittelten Mess-

werten. Sind solche Richtwerte nicht vorhanden, sollte - ausgehend von den Versuchserfahrungen (vgl. Punkt C 2.2.1.4) - unter Bedingungen einer ergänzenden N-Düngung eine **kompostbedingte Anhebung der $N_{\min}$ -Gehalte** von

im Mittel von 5 - 15 kg/ha

veranschlagt werden. Höhere Werte bis zu 25 kg/ha sind möglich (vgl. auch Tabelle 9 und Punkt A 3.2).

A 2.2.4 Abschlussbewertung

Zusammenfassend, das zeigen die Ergebnisse des Abschnittes A 2 „Pflanzenbauliche Vorteilswirkungen“, besteht die mittel- bis langfristige Wirkung regelmäßiger Kompostgaben in einer nachhaltigen Verbesserung aller überprüften physikalischen und biologischen Parameter sowie des Humushaushaltes des Bodens. Vor allem die für die pflanzenbauliche Bodennutzung wesentlichen Eigenschaften, wie Befahrbarkeit, Bodenaktivität, Wasserspeicherung und Erosionsminderung, zeigten eine positive Entwicklung. Ergänzt werden diese Vorteilswirkungen durch die Zuführen an Nährstoffen und Kalk, aus denen sich wertvolle Einsparpotenziale ergeben. Dadurch wird die Bodenfruchtbarkeit allgemein und letztlich auch der Ernteertrag (vgl. Punkt C 2.5) gefördert, der unter Bedingungen intensiver Pflanzenproduktion Mehrerträge von 5 - 10 % erreichen kann.

A 3 Mögliche Risiken

Ausgehend von der ganzheitlichen Konzeption war es ein maßgebendes Ziel des Kompostprojektes, neben der Ermittlung der relevanten Vorteilswirkungen auch alle denkbaren Risikoaspekte der Kompostanwendung umfassend und objektiv zu prüfen. Denn nur, wenn die Belange des Umweltschutzes (Boden- und Gewässerschutzes) sowie des Verbraucherschutzes (qualitativ hochwertige pflanzliche Nahrungsmittel) langfristig gewährleistet sind, kann von einer nachhaltigen, also auch umweltgerechten Kompostanwendung in der Pflanzenproduktion gesprochen werden.

Die Kompost-Anwendungsversuche boten dafür mit ihrem einheitlichen und über Jahre konsequent verfolgten Versuchsansatz eine wertvolle, solide Grundlage. Mit Hilfe der Feldversuche wurden *alle Fragen zur Risikobewertung der Kompostanwendung*, die in den vergangenen zwei Jahrzehnten in der Fachöffentlichkeit aufgeworfen und diskutiert wurden, in - teilweise sehr umfangreichen und kostenaufwendigen - Untersuchungsprogrammen geprüft. Gegenstand der Untersuchungen waren im wesentlichen folgende Punkte:

- Schwermetallsituation: Gehalte und Frachten der Kompostgaben, Einflüsse auf Böden und Ernteprodukte
- organische Schadstoffe: umfassendes Monitoring zu Gehalten in Böden
- Seuchen- und Phytohygiene: Situation von Komposten
- Unkrautsamen: Besatz in Komposten und Böden
- Fremdstoffe und Steine: Situation von Komposten
- N-Mineralisation: Bewertung möglicher N-Positivsalden von Böden, Auswirkungen auf $N_{\min}$ -Gehalte

Nachfolgend werden die **Ergebnisse einer Risikoabwägung** vorgestellt, die auf wissenschaftlichen Ergebnissen aufbaut, diese umfassend und unter Einbeziehung von Literaturangaben und Praktikererfahrungen überprüft und dabei auch Besorgnisse der Öffentlichkeit einbezieht. Ziel ist es, die möglichen Risiken in ihrer Relevanz (Rangfolge) für den Umwelt- und Verbraucherschutz objektiv herauszuarbeiten, um letztlich eine ganzheitliche Beurteilung vorzulegen.

A 3.1 Unerwünschte Stoffe

A 3.1.1 Schwermetallsituation

Die Gehalte der gütegesicherten Komposte an unerwünschten Schwermetallen (Pb, Cd, Cr, Ni, Hg) unterschreiten die Grenzwerte der Bioabfall-Verordnung, wie umfangreiche Übersichtsuntersuchungen belegen, mittlerweile deutlich (vgl. Tabelle 7 und Punkt C 1.2.1.1). Die Ausschöpfungsraten bewegen sich im Mittel unter 30 %, im ungünstigen Fall (90 % aller Ergebnisse) unter 50 % der Grenzwerte. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung für den nachhaltigen Bodenschutz beim Einsatz von Komposten gewährleistet. Höhere Ausschöpfungsraten bei Cu und Zn, im Mittel unter 50 %, im ungünstigen Fall unter 80 %, sind noch tolerierbar, solange sich die geogenen Gehalte der Böden unterhalb von nicht zu überschreitenden Hintergrundwerten bewegen und durch die geringen Zufuhren keine merkliche Anhebung der Bodengehalte erfolgt.

Bedingt durch die minimalen Schwermetallentzüge der Pflanzen (Ernteprodukte) verbleibt allerdings stets ein Positivsaldo im Boden, der jedoch *absolut* gering ausfällt und damit aus Sicht des Bodenschutzes kalkulierbar bleibt. Das belegen anschaulich die **Schwermetall-Gesamtgehalte des Bodens** (vgl. Tabelle 7 und Punkt C 2.2.1.7):

Die Gehalte an unerwünschten Schwermetallen (Pb, Cd, Cr, Ni, Hg) sind in den Feldversuchen nach 9 bzw. 12jähriger Kompostanwendung nicht angestiegen - auch nicht bei überhöhten Kompostgaben von jährlich 20 t/ha TM, d.h. *dem Zweifachen* der maximal zulässigen Kompostgabe. Lediglich die Cu- und Zn-Gehalte zeigten bei Gaben ab jährlich 10 t/ha TM in der Ackerkrume eine gering steigende Tendenz, die allerdings angesichts der bodenbedingten Streuung analytisch nicht gesichert ist. Auch in tieferen Bodenschichten (30 - 60 cm und 60 - 90 cm) waren nach mehrjähriger Kompostanwendung durchweg keine Veränderungen der Schwermetallgehalte festzustellen (vgl. Punkt C 2.2.1.9). Eine Verlagerung von Schwermetallen im Bodenprofil ist demnach, wie die Versuche belegen, praktisch ausgeschlossen.

Die **mobilen Schwermetallgehalte des Bodens** blieben, wie der DBU-Projektbericht 2003 gezeigt hat, bei Pb und Cr unverändert und gingen bei Cd, Ni und Zn, bedingt durch die sinkende Löslichkeit auf Grund der nach Kompostgaben gestiegenen pH-Werte, sogar deutlich zurück. Der mobile Cu-Gehalt zeigte vereinzelt geringfügige Anstiege. Gefahren durch bedenkliche Mobilisierungen der Schwermetalle nach Kompostanwendung sind nach diesen Ergebnissen praktisch nicht relevant.

Angesichts gleichbleibender Schwermetall-Gesamtgehalte und einer allgemein fehlenden, bei Cd, Ni und Zn sogar rückläufigen Mobilisierung blieben die **Schwermetallgehalte der Ernteprodukte** im Versuchsverlauf im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost durchweg unverändert

Tabelle 7 Schwermetallsituation nach langjähriger pflanzenbaulicher Kompostanwendung:
Komprimierte Projektergebnisse

Gültig für pflanzbaulich optimale Kompostgaben von **20 t/ha TM im 3jährigen Turnus**

Schwermetalle			
Komposte	Mittlerer Bereich	90. Quantil	Beurteilung
Gehalte ⁵ in % der Grenzwerte der Bioabfall-Verordnung ⁶			
Hg	10 - 15	25	geringe Ausschöpfung der Grenzwerte
Pb, Cd, Cr, Ni	20 - 30	40 - 50	
Cu, Zn	40 - 50	65 - 80	mittlere Ausschöpfung der Grenzwerte
Bodengehalte	Veränderung in 9 bzw. 12 Jahren	Beurteilung	
Gesamtgehalte Ackerkrume ⁷			
Pb, Cd, Cr, Ni, Hg	unverändert	unerwünschte Schwermetalle → mittelfristig (10 - 30 Jahre) keine Gefahr bedenklicher Bodenkontaminationen	
Cu, Zn	minimal ansteigend	Anstiege von 2 (Cu) bzw. 4 mg/kg (Zn) kaum bedenklich , da gleichzeitig essenzielle Spurennährstoffe	
Gesamtgehalte Bodenprofil (30 - 60 cm, 60 - 90 cm)			
Pb, Cd, Cr, Ni, Cu, Zn, Hg	unverändert	keine Gefahr bedenklicher Bodenkontaminationen durch Ver- lagerung von Schwermetallen, auch nicht bei Cu und Zn	
Mobile Gehalte ⁸			
Pb, Cr	unverändert	keine Gefahr bedenklicher Schwermetall-Mobilisierungen, Rückgänge bedingt durch pH-Anhebung des Bodens	
Cd, Ni, Zn	rückläufig		
Cu	minimal ansteigend		
Pflanzengehalte und -entzüge	Veränderung in 9 bzw. 12 Jahren	Beurteilung	
Pflanzengehalte			
Pb, Cd, Cr, Ni, Cu, Zn	unverändert, ver- einzelt rückläufig	keine Gefahr bedenklicher Schwermetall-Gehalte, Rückgänge bei Cd, Ni bedingt durch pH-Anhebung des Bodens	
Schwermetallentzug Ernteprodukte in % der Kompostzufuhr ⁹			
Pb, Cr, Ni	<5	Schwermetall-Saldo stets deutlich positiv , Zufuhren jedoch absolut gering	
Cu, Cd	5 - 10		
Zn, Hg	10 - 30		

⁵ Bundesweite Übersichtsuntersuchung der BGK: Jahre 2004 und 2005, Stichprobe: ca. 5.700 Kompostproben.

⁶ Grenzwerte Bioabfall-Verordnung für Kompostgaben von 20 t/ha TM im 3jährigen Turnus.

⁷ Ergebnisse Kompost-Anwendungsversuche: Stand nach 9 bzw. 12jähriger Versuchsdurchführung.

⁸ Ergebnisse DBU-Projektbericht 2003: Stand nach 8jähriger Versuchsdurchführung.

⁹ Zufuhr mit 30 t/ha Kompost in 3 Jahren.

(vgl. Tabelle 7 und Punkt C 2.3.2.1). Bei Pb, Cd, Cr und Ni waren sogar geringe Absenkungen zu beobachten. Eine Gefährdung der Qualität pflanzlicher Nahrungsmittel durch Schwermetalleinträge mit regelmäßigen Kompostgaben ist damit nach den langjährigen Versuchsergebnissen praktisch ausgeschlossen.

Abschließend ist zur Schwermetallsituation festzustellen, dass - über sehr lange Zeiträume betrachtet - eine geringe Anhebung der Schwermetallgehalte des Bodens angesichts des Positivsaldos an Schwermetallen bei regelmäßiger Kompostanwendung in hohen Gaben rein rechnerisch nicht auszuschließen ist. Eine Risikoabwägung anhand der vorliegenden objektiven Fakten zeigt jedoch eindeutig, dass das mögliche Risiko praktisch nachrangig und damit beherrschbar und kalkulierbar ist. Eine Bodenakkumulation verläuft ausgesprochen langsam und ist im Minimum nach 10 - 20 Jahren überhaupt erst analytisch feststellbar. Durch Bodenuntersuchungen¹⁰ in großen Abständen kann zuverlässig gewährleistet werden, dass solche Anhebungen nicht unerkannt auftreten. Gefahren durch irreversible, schädigende Bodenkontaminationen bestehen damit definitiv nicht. Die Frachten an Cu und Zn sind angesichts der Tatsache, dass beide Schwermetalle als *essenzielle Spurennährstoffe* von den Pflanzen zwingend benötigt werden, nicht nur von Nachteil. Diese - absolut geringen - Frachten sind - im Gegenteil - auf Böden mit niedrigen Gehalten dieser Spurennährstoffe sogar erwünscht, denn sie tragen zur ausreichenden Versorgung der Pflanzen bei (reguläre Düngergaben dieser Spurennährstoffe fallen um den Faktor 5 - 10 höher aus!). Solange geogene Hintergrundwerte sowie die Bodengrenzwerte lt. Bioabfall-Verordnung deutlich unterschritten werden, sind deshalb die Cu- und Zn-Frachten regelmäßiger Kompostgaben auf jeden Fall tolerierbar.

Trotzdem bleibt es eine permanente Aufgabe, im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes dafür zu sorgen, dass sich der Schwermetallstatus des Bodens durch die Kompostanwendung nicht verschlechtert. Dazu ist die Schwermetallzufuhr mit Kompostgaben so weit als möglich abzusenken („Minimierungsgebot“). Außerdem sollte Kompost nur auf Böden eingesetzt werden, welche die Vorsorgewerte lt. Bundes-Bodenschutz-Verordnung unterschreiten.

A 3.1.2 Organische Schadstoffe

Langjährige regelmäßige Untersuchungen der in den Versuchen eingesetzten Komposte auf persistente **PCB und PCDD/F** zeigten, dass die Gehalte absolut sehr niedrig ausfallen und sich im Bereich nahe der Hintergrundbelastung bewegen (vgl. Tabelle 8 und Punkt C 1.2.2). Entsprechend blieben auch die Gehalte der regelmäßig mit Kompost behandelten Böden in den Feldversuchen unbeeinflusst, selbst bei überhöhten Kompostgaben von jährlich 20 t/ha TM. Sie bewegen sich im Bereich von Hintergrundwerten unbelasteter Böden (PCB - <2 µg/kg, PCDD/F - 1 - 2 ng I-TEQ/kg, vgl. Punkt C 2.2.1.8).

Zum Abschluss des Kompostprojektes wurden Bodenproben zusätzlich auf eine Reihe von organischen Schadstoffen untersucht, die in den vergangenen Jahren als für den Bodenschutz relevant diskutiert worden waren. Im Ergebnis der aufwändigen Untersuchung von **Gruppen organischer Schadstoffe** (Organochlorpestizide, PAK, Phthalate, Organo-Zinn-Verbindungen,

¹⁰ Sie sind zudem lt. Bioabfall-Verordnung gesetzlich vorgeschrieben.

Chlorphenole, Nonylphenole, Bisphenol A, Moschusverbindungen) zeigte sich, dass die langjährige Kompostanwendung auf alle diese Stoffe keinerlei Einfluss genommen hat, auch nicht bei überhöhten Gaben (vgl. Tabelle 8 und Punkt C 2.2.1.8). Die Bodengehalte bewegten sich überwiegend auf absolut geringem Niveau, meist im Bereich der analytischen Nachweisgrenze bzw. von Hintergrundwerten für unbelastete Böden.

Tabelle 8 Organische Schadstoffe nach langjähriger pflanzenbaulicher Kompostanwendung: Komprimierte Projektergebnisse

Gültig für pflanzbaulich optimale Kompostgaben von **20 t/ha TM im 3jährigen Turnus**

Organische Schadstoffe		
PCB und PCDD/F	Mittlerer Bereich	Beurteilung
Gehalte Komposte¹¹ in % von Orientierungswerten¹²		
PCB	20 - 30	absolut sehr niedrig, nahe Hintergrundbelastung; Belastung für Kompostanwendung unproblematisch
PCDD/F	35 - 45	
Gehalte Boden	unbeeinflusst	im Bereich der Hintergrundbelastung (PCB <2 µg/kg, PCDD/F 1 - 2 ng I-TEQ/kg); Kein Einfluss langjähriger Kompostanwendung erkennbar
Weitere organische Schadstoffe	Anzahl Einzelverbindungen	Beurteilung
Gehalte Boden nach Versuchsabschluss		
Organochlorpestizide	29	- Gehalte überwiegend auf absolut geringem Niveau (µg/kg), meist im Bereich der anal. Nachweisgrenze bzw. von Hintergrundwerten - PAK im Bereich von Referenzwerten für unbelastete Böden Insgesamt: Durchweg kein Einfluss der langjährigen Kompostanwendung erkennbar , auch nicht bei überhöhten Gaben
PAK	20	
Phthalate	10	
Organo-Zinn-Verbind.	10	
Chlorphenole	27	
Bisphenol A	1	
Nonylphenole	3	
Moschusverbindungen	2	

Zusammenfassend ergeben sich aus den Kompost-Anwendungsversuchen keine Hinweise, dass eine regelmäßige Kompostanwendung zur Anreicherung der untersuchten organischen Schadstoffe im Boden führt. Ein diesbezügliches Risiko besteht nach der vorliegenden umfangreichen Datenlage nicht.

A 3.2 Weitere mögliche Risiken

Die **N-Mineralisation** der mit Kompostgaben in den Boden eingebrachten organischen Substanz verläuft, wie die umfangreichen Untersuchungen während der 9 bzw. 12jährigen Ver-

¹¹ Ergebnisse aus Kompost-Anwendungsversuchen, Stichprobe von 54 Kompostproben.

¹² Orientierungswerte absolut: PCB - 200 µg/kg TM, PCDD/F - 17 ng I-TEQ/kg TM (1/6 der Grenzwerte lt. Klärschlamm-Verordnung).

suchsdauer belegten, langsam und damit kontrollierbar ab. Der **lösliche N-Pool** des Bodens wird deshalb *nur ganz allmählich* angehoben. Ausgehend von den Versuchsergebnissen (vgl. Tabelle 9 und Punkt C 2.2.1.4) ist unter Bedingungen einer ergänzenden N-Düngung mit einer **kompostbedingten Erhöhung der N_{min}-Gehalte** von

im Mittel von 5 - 15 kg/ha

zu rechnen. Höhere Werte bis zu 25 kg/ha sind möglich. Die feste N-Bindung in der organischen Substanz gewährleistet, dass es nicht zu plötzlichen und erheblichen Freisetzungen löslicher Nitratanteile und ihre Einwaschung in das Grundwasser kommt.

Tabelle 9 Weitere mögliche Risiken einer langjährigen pflanzenbaulichen Kompostanwendung: Komprimierte Projektergebnisse

Gültig für pflanzbaulich optimale Kompostgaben von **20 t/ha TM im 3jährigen Turnus**

Weitere mögliche Risiken			
N-Überhang der Kompostgabe		Mittlerer Bereich	Beurteilung
Anhebung N _{min} -Gehalte in kg/ha		5 - 15	- keine rasche, ökologisch bedenkliche Erhöhung des löslichen N-Pools im Boden - N-Auswaschung beherrschbar
N-Auswaschung aus dem Boden		minimal	
Fremdstoffe und Steine (% TM)			
	Mittlerer Bereich	90. Quantil	Beurteilung
Fremdstoffe >2 mm	0,08 - 0,13	0,35	- durchweg deutlich niedriger als Grenzwerte ¹³ - Komposte praktisch frei von Fremdstoffen, Steinanteil gering
Steine >5 mm	1,0 - 1,5	3,5	
Seuchen- und Phytohygiene		Beurteilung	
Mikrobiologie Bakterien und Pilze in Komposten		hohe Bakterienzahlen von 10 ⁶ - 10 ⁸ /g FM sowie hohe Pilzanteile von 10 ⁴ - 10 ⁷ /g FM vorteilhaft , fördern mikrobiologische Aktivität im Boden	
Seuchenhygiene - Erreger von Humankrankheiten (Salmonella) - koliforme Keime		Bei ordnungsgemäßer Heißrotte : - Salmonella: nicht vorhanden - koliforme Keime: überwiegend < Orientierungswerte Keine Gefahr für die hygienische Qualität der Ernteprodukte	
Phytohygiene Erreger von Pflanzenkrankheiten		bei ordnungsgemäßer Heißrotte nicht vorhanden	
Unkrautsamen und -besatz - Unkrautsamen Komposte - Unkrautbesatz Ackerfläche		- Unkrautsamen Kompost: bei ordnungsgemäßer Heißrotte praktisch nicht vorhanden - Unkrautbesatz Ackerfläche: in Versuchen (54 Boniturjahre!) durchweg kein erhöhter Unkrautbesatz im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost	

Ein solches Risiko besteht deshalb praktisch nicht, wenn die ergänzende N-Düngung um dem Betrag der N-Ausnutzungsquote der Kompostgaben und die mittlere Anhebung der N_{min}-

¹³ Grenzwerte lt. Bioabfall-Verordnung: Fremdstoffe >2 mm - 0,5 % TM, Steine >5 mm - 5 % TM.

Gehalte, d.h. im Mittel um etwa 10 - 15 % der pflanzenbaulich erforderlichen N-Gabe, vermindert wird.

Fremdstoffe und Steine bilden beim Einsatz gütegesicherter Komposte inzwischen praktisch kein Problem mehr. Die Gehalte an Fremdstoffen >2 mm bewegen sich im Mittel (Medianwerte) unter 0,1 % TM und unterschreiten auch im ungünstigen Fall (90. Quantil) den Grenzwert lt. Bioabfall-Verordnung deutlich (vgl. Tabelle 9 und Punkt C 1.2.3). Trotzdem bleibt es für die Akzeptanz der landbaulichen Kompostanwendung unverzichtbar, dass Komposte *frei von Fremdstoffen* sind, vor allem frei von Plastikfolien¹⁴, die das optische Erscheinungsbild nach der Kompostausbringung massiv beeinträchtigen können, obwohl keine Gefährdung für Böden und Ernteprodukte besteht. Steine können im Vergleich zu anderen unerwünschten Stoffen als nachrangiges Risiko eingestuft werden. Im Mittel der Übersichtsuntersuchungen betrug der Steinanteil >5 mm von Komposten 1,0 - 1,5 % TM.

Die **Seuchen- und Phytohygiene** der pflanzenbaulich verwerteten Komposte, d.h. die Freiheit von seuchenhygienisch bedenklichen Krankheitserregern (Leit-Mikroorganismus Salmonella) sowie Erregern von Pflanzenkrankheiten, ist - wie zahlreiche Untersuchungen belegen (vgl. Tabelle 9 und Punkt C 1.3) - stets gewährleistet, wenn eine *ordnungsgemäße Heißrotte* (mindestens 65 °C über einen Zeitraum von 7 Tagen) durchgeführt wurde. Stichprobenartige Untersuchungen an Komposten des Projektes zeigten, dass sich auch die Anteile koliformer Keime unterhalb von unbedenklichen Orientierungswerten bewegten. An den gleichen Proben wurden hohe Gehalte an Bakterien und Pilzen festgestellt. Sie sind als Ausdruck für biologisch aktive Komposte zu werten, die die mikrobiologische Aktivität des Bodens in der Regel fördern.

Auch die **Anzahl keimfähiger Samen und austriebsfähiger Pflanzenteile** der Komposte bewegt sich im unbedenklichen Bereich, wenn eine *ordnungsgemäße Heißrotte* erfolgt ist - eine wesentliche Voraussetzung für ihren landwirtschaftlichen Einsatz (vgl. Tabelle 9 und Punkt C 1.2.4). Das belegten die umfangreichen Übersichtsuntersuchungen der Kompost-Gütesicherung (vgl. Tabelle 17), die im Mittel eine Anzahl von 0,09 Keimpflanzen/l FM erbrachten - ein Wert, mit dem der Grenzwert lt. Bioabfall-Verordnung von 2 Keimpflanzen/l FM *um Größenordnungen* unterschritten wird. Gütegesicherte Komposte sind demnach praktisch frei von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen. Das wurde auch durch die jährlichen Beobachtungen des Unkrautbesatzes auf den Versuchsflächen bestätigt. Im Ergebnis von 54 (!) Jahresbonituren des Gesamt-Unkrautdeckungsgrades (GUD) konnte in keinem Fall ein messbarer Unkrautbesatz festgestellt werden, der auf die Kompostanwendung zurückzuführen gewesen wäre. Ergänzende Recherchen bei Landwirten, die Komposte regelmäßig einsetzen, haben diesen Befund bestätigt. Damit ist die häufig geäußerte Befürchtung, dass mit der Kompostanwendung eine zunehmende Verunkrautung der Ackerflächen verbunden sein könnte, fachlich widerlegt und nicht zutreffend.

¹⁴ Die BGK e.V. hat dazu inzwischen einen weiteren Bewertungsmaßstab für die Gütesicherung von Komposten eingeführt, der vor allem den Anteil an Plastikfolien erfasst.

A 3.2.1 Abschlussbewertung

Im Ergebnis der umfassenden und ganzheitlichen Abwägung im Rahmen des wissenschaftlichen Kompostprojektes kann **zusammenfassend** festgestellt werden, dass die möglichen Risiken der pflanzenbaulichen Verwertung von Komposten insgesamt gering und kalkulierbar sind, wenn die Komposte nach den „Regeln guter fachlicher Praxis“, d.h. entsprechend dem Bedarf von Böden und Pflanzen eingesetzt werden. Das trifft vor allem für die Schwermetall- und Schadstoffsituation zu. Das Risiko unerwünschter Schwermetallakkumulationen im Boden ist, wie die langjährigen Feldversuche gezeigt haben, nachrangig und damit beherrschbar. Diesbezügliche Befürchtungen, die in der Vergangenheit vor allem aus Fachbereichen des Boden- und Gewässerschutzes vorgetragen wurden, verbunden mit Forderungen nach Verschärfung entsprechender Grenzwerte, haben sich nach den vorliegenden Ergebnissen als fachlich überzogen erwiesen, weil sie die realen Verhältnisse nicht objektiv richtig widerspiegeln. Auch bezüglich der aktuell umweltrelevanten organischen Schadstoffe besteht für den Boden praktisch kein Risiko. Gleiches gilt für die Seuchen- und Phytohygiene sowie die Unkrautsamen, jedoch stets unter der Voraussetzung, dass eine ordnungsgemäße Heißrotte der Komposte erfolgt ist. Letztlich ist - sofern überhaupt - als mögliches Risiko mit einer gewissen Relevanz die N-Mineralisierung zu nennen. Sie muss durch geeignete Parameter, wie den löslichen N-Anteil am N-Gesamtgehalt des Kompostes sowie die $N_{\min}$ -Gehalte des Bodens, kontrolliert werden, um unerwünschte Nitratfreisetzungen im Boden zuverlässig zu vermeiden.

A 4 Nachhaltige Kompostanwendung - Grundsätze und Anwendungsempfehlungen

A 4.1 Grundsätze und Entscheidungsfindung

Nachhaltige Kompostanwendung heißt, dass beim Einsatz von Komposten in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion bestimmte Voraussetzungen und Anwendungsregeln einzuhalten sind, damit die notwendigen Anforderungen des Boden- und Umweltschutzes optimal mit den Vorteils- und Nutzwirkungen verbunden werden, um über lange Zeiträume eine schadlose Verwertung zuverlässig zu gewährleisten.

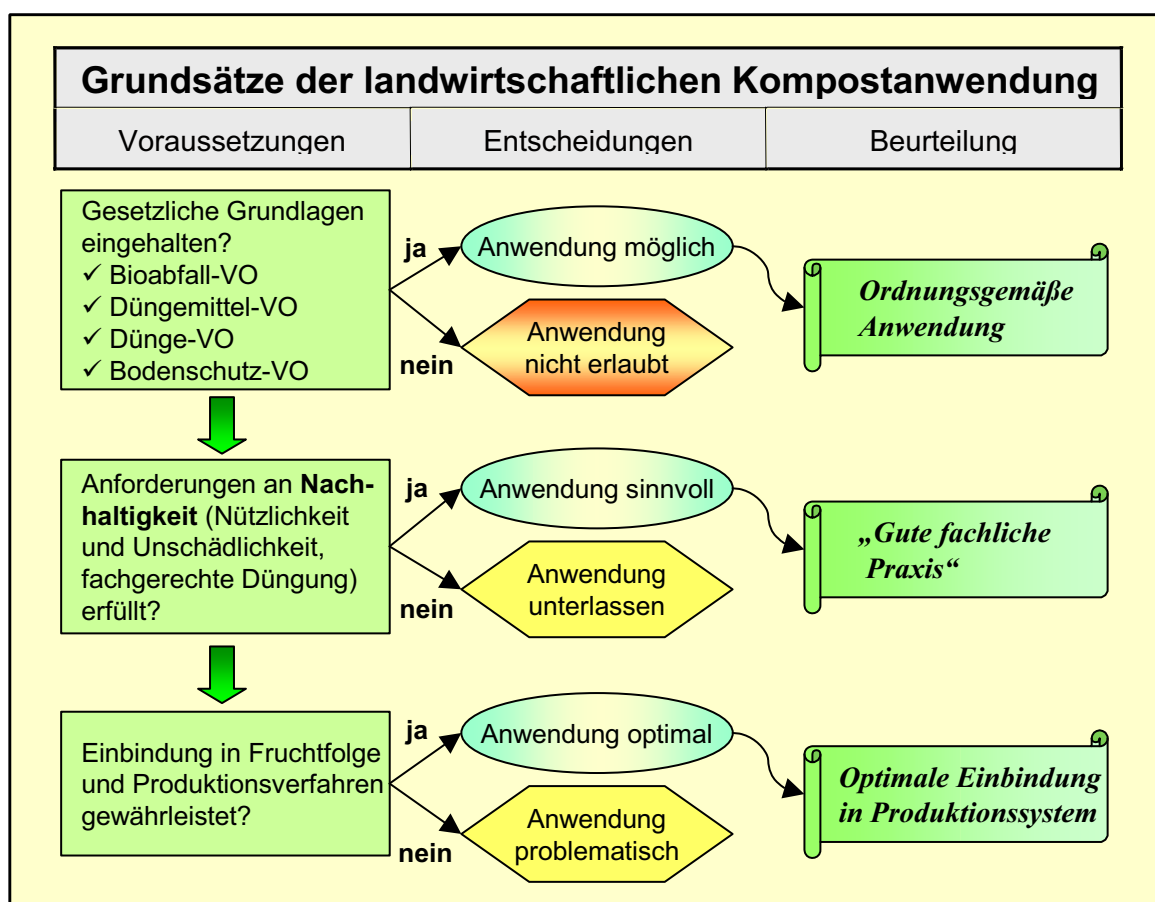
Die **Grundsätze der landwirtschaftlichen Kompostanwendung** lassen sich wie folgt zusammenfassen (vgl. Kasten 1):

- *Ordnungsgemäße Anwendung* → Eine Kompostanwendung im Pflanzenbau ist grundsätzlich nur möglich, wenn die Vorgaben der Bioabfall-Verordnung erfüllt sind. Darüber hinaus unterliegen Komposte und ihre Anwendung - wie alle anderen Düngemittel - den Bestimmungen der Düngemittel-Verordnung, der Dünge-Verordnung und der Bodenschutz-Verordnung.
- *„Gute fachliche Praxis“* → Nachhaltige Kompostanwendung heißt aber zusätzlich, dass neben dem unschädlichen Einsatz auch alle Belange der Nützlichkeit, d.h. eine fachge-

rechte Anwendung als Düngemittel nach den Regeln „guter fachlicher Praxis“ lt. Düngerverordnung gewährleistet sind¹⁵. Wenn das nicht der Fall ist, sollte eine Anwendung unterlassen werden.

- *Optimale Einbindung in das pflanzenbauliche Produktionssystem* → Die Vorteilswirkungen lassen sich nur dann im vollem Umfang realisieren, wenn der Komposteinsatz optimal in die Fruchtfolge und das Produktionssystem (Bodenbearbeitung u.a.) eingepasst wird. Dazu gehört auch, Komposte vorrangig auf Standorten mit dem höchsten Nutzeffekt einzusetzen („Nutzenoptimierung“).

Kasten 1 Landwirtschaftliche Kompostanwendung: Grundsätze



Um die nachhaltige Kompostanwendung im konkreten Praxisfall optimal zu gestalten, sollte zweckmäßig folgender **Leitfaden zur Entscheidungsfindung** herangezogen werden:

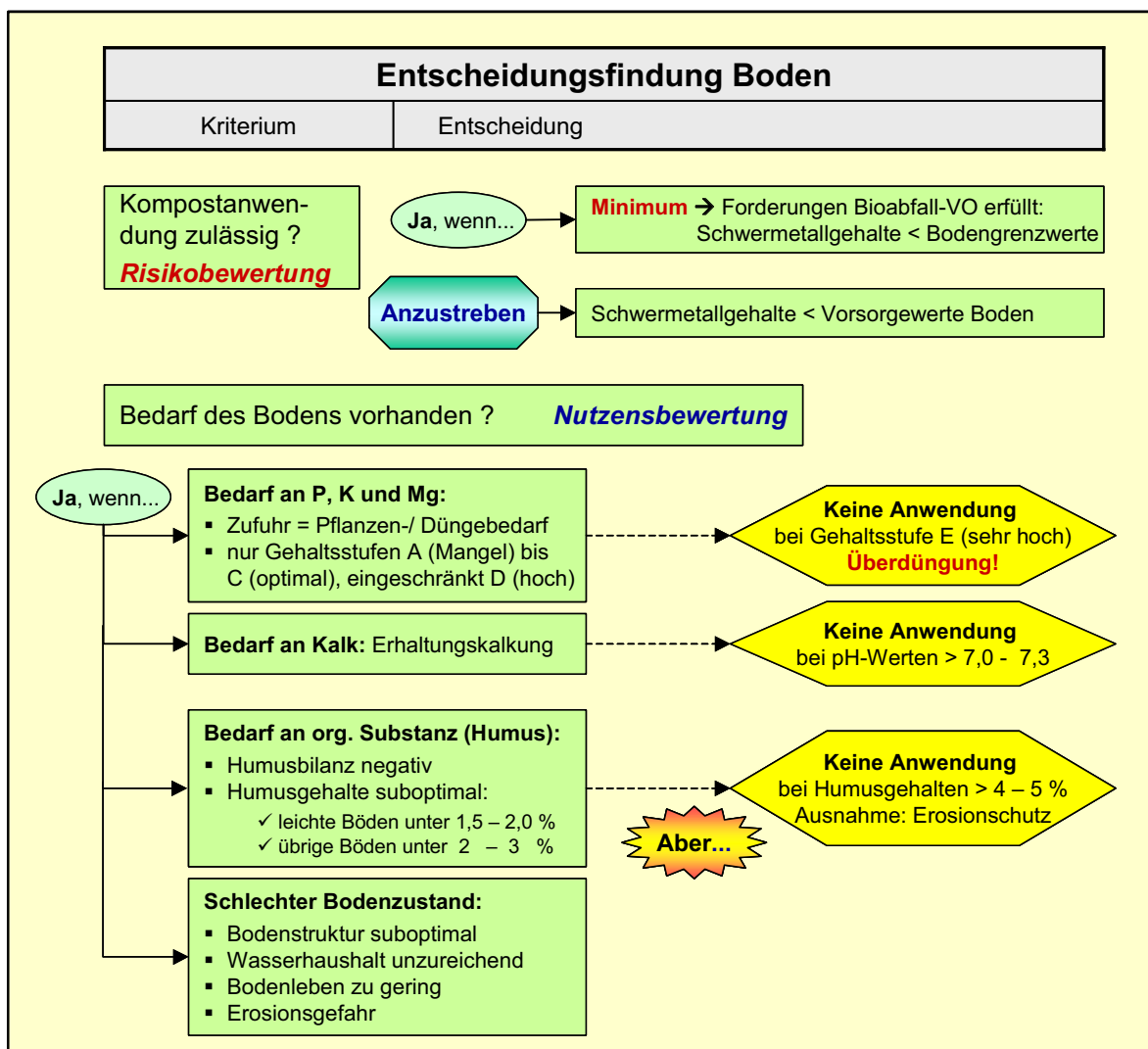
Beginnend mit der **Entscheidungsfindung „Boden“** (vgl. Kasten 2) ist im **1. Schritt** zu klären, ob auf der infrage kommenden landwirtschaftlichen Nutzfläche *überhaupt Kompost eingesetzt werden darf*. Dazu müssen die Schwermetallgehalte des Bodens die Grenzwerte lt. Bioabfall-Verordnung unterschreiten, besser noch im Bereich der Vorsorgewerte lt. Bodenschutz-

¹⁵ Die „gute fachliche Praxis“ der Düngung lt. Düng-Verordnung gilt auch vollumfänglich für die Anwendung von Komposten, die in der Regel als organische Düngemittel ausgewiesen sind. Erkenntnisse dieses Projektes sollten in Anwendungsempfehlungen sowie bei der Weiterentwicklung der „guten fachlichen Praxis“ der Kompostanwendung berücksichtigt werden.

Verordnung liegen. Werden die Grenzwerte überschritten, ist eine Kompostverwertung grundsätzlich nicht zulässig¹⁶. Das gilt gleichfalls, wenn eine Kompostanwendung für bestimmte Anwendungsbereiche auf Grund von Flächenrestriktionen (z.B. Grünland, gleichzeitige Aufbringung von Klärschlamm innerhalb von drei Jahren) verboten ist.

Im **2. Schritt** ist gemäß Dünge-Verordnung zu prüfen, ob und wenn ja welchen *konkreten Düngbedarf der Boden und die angebauten Kulturen* haben und inwieweit er *durch Kompostgaben gedeckt* werden kann („Nutzensbewertung“). Hierbei geht es um den Düngbedarf an Kernnährstoffen (Phosphor, Kalium, Magnesium) und Kalk sowie um den Humusbedarf des Bodens. Empfohlene Aufwandmengen an Kompost von jährlich 7 bis maximal 10 t/ha TM richten

Kasten 2 Landwirtschaftliche Kompostanwendung: Entscheidungsfindung Boden



¹⁶ Bei Überschreitung der Schwermetallgrenzwerte des Bodens in geogen vorbelasteten Regionen kann eine Kompostanwendung durch die zuständige Behörde nach §9 (4) BioAbfV genehmigt werden, wenn keine weitere Erhöhung der gegebenen Schwermetallgehalte des Bodens erfolgt. Dass ist stets dann gewährleistet, wenn die Schwermetallgehalte der Komposte, bezogen auf den anorganischen Rest (Glührückstand), die entsprechenden Bodengehalte unterschreiten.

sich dabei in der Regel nach dem Düngebedarf an Kernnährstoffen gemäß Dünge-Verordnung, der durch die Ertragserwartung sowie die düngewirksamen Nährstoffanteile des Bodens bestimmt wird. In letzter Zeit wird aber die Deckung und Optimierung des Humusbedarfs der Böden zunehmend zum Schwerpunkt der Kompostanwendung, vor allem bei suboptimalen Bodenbedingungen.

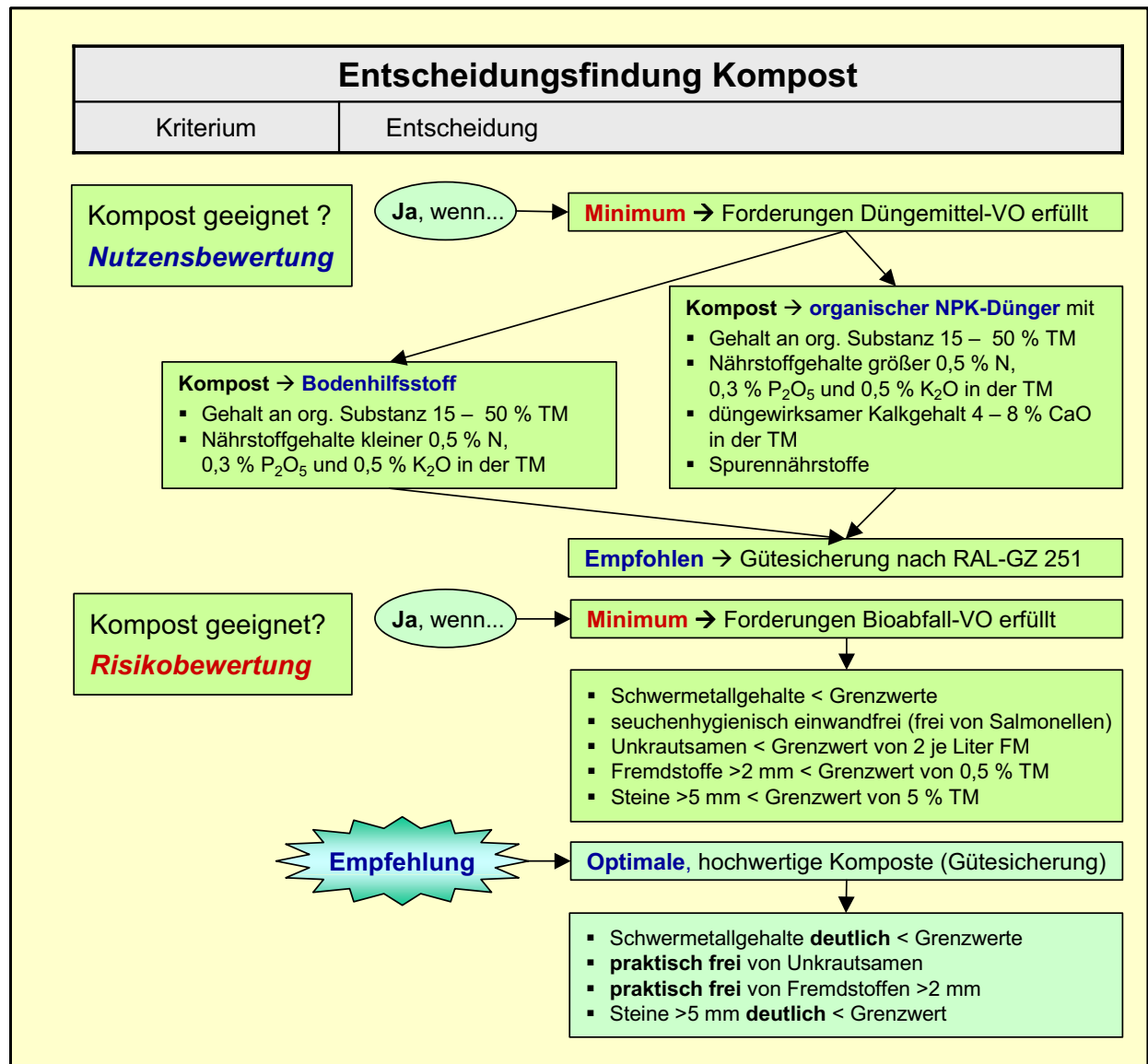
Bedarf an organischer Kompostsubstanz besteht vor allem dann, wenn die Humusbilanz negativ ausfällt, häufig bei Marktfruchtbetrieben mit intensiver Produktion und Strohabfuhr, und die Humusgehalte des Bodens Optimalwerte für einzelne Bodenarten unterschreiten. Andererseits sollte jedoch der Komposteinsatz bei sehr hohen Humusgehalten begrenzt werden, mit Ausnahme von Böden mit akuter Erosionsgefahr. Kompost wirkt in erster Linie bei **schlechten Bodenzuständen**, wie einer suboptimalen Bodenstruktur (z.B. Bodenverdichtungen), einem unzureichenden Wasserhaushalt (z.B. zu geringe Wasserbindung bzw. nutzbare Feldkapazität), einer zu geringen Bodenaktivität (z.B. unzureichende mikrobielle Biomasse, auch zu geringe Regenwurm-tätigkeit u.a.) und nicht zuletzt bei erhöhter Erosionsgefahr, vorteilhaft. Die Projektergebnisse haben klar gezeigt, dass auf Grund des hohen Anteiles an reproduzierbarem Kohlenstoff in Komposten eine nachhaltige Humusanreicherung im Boden stattfindet, auch wenn das Niveau einer ausgeglichenen Humusbilanz überschritten wird.

Mit regelmäßigen Kompostgaben kann der **Düngebedarf an Kernnährstoffen** (Phosphor, Kalium, Magnesium), sofern Bedarf besteht, d.h. die Versorgung des Bodens unzureichend (Gehaltsklassen A und B) bzw. ausreichend ist (Gehaltsklasse C), zumindest teilweise, meist sogar vollständig gedeckt werden. In der Regel bilden die Zufuhren an Phosphor und Kalium auf Grund ihrer optimalen Düngewirksamkeit (volle Anreicherung in der Düngebilanz!) den *begrenzenden Faktor der Kompostanwendung*. Um eine ausgeglichene Düngebilanz zu gewährleisten, darf Kompost deshalb - wie andere Düngemittel auch - bei Gehaltsklasse D nur eingeschränkt und bei Gehaltsklasse E nicht mehr angewendet werden, um mögliche Überdüngungen des Bodens, verbunden mit der Gefahr der Nährstoffauswaschung (vor allem Kalium!) sicher zu vermeiden. Letztlich ist auch die **Kalkzufuhr** mit Kompostgaben, in der Regel in der Größenordnung einer Erhaltungskalkung, zu berücksichtigen. Bei sehr hohen pH-Werten ist jedoch eine Kompostanwendung zu unterlassen, um weitere pH-Anhebungen in pflanzenbaulich ungünstige pH-Bereiche zu vermeiden.

Im **3. Schritt** der Entscheidungsfindung ist die Eignung des einzusetzenden Kompostes zu klären (vgl. Kasten 3). Dafür kommen nur Komposte infrage, die die Vorgaben der Düngemittel-Verordnung an **organische NPK-Dünger** (Nährstoffgehalte $>0,5$ % N bzw. K_2O und $>0,5$ % P_2O_5) oder **organische PK-Dünger** erfüllen. Bei niedrigeren Nährstoffgehalten sind die Komposte als **Bodenhilfsstoffe** einzustufen. Eine erhöhte Anwendungssicherheit können dabei *gütegesicherte Komposte* erbringen, insbesondere bei der Gewährleistung der Risikokriterien. Hierbei geht es - über die Erfüllung der Vorgaben der Bioabfall-Verordnung hinaus - darum, dass die Schwermetallgehalte die Grenzwerte möglichst weit unterschreiten, die Komposte von Fremdstoffen >2 mm möglichst *frei* sind (Werte um 0,1 % TM und niedriger), nur geringe Anteile an Steinen >5 mm aufweisen sowie keine Unkrautsamen enthalten und die Komposte im Ergebnis einer ordnungsgemäßen Heißrotte einen einwandfreien seuchen- und phytohygienischen Status aufweisen. Gütegesicherte Komposte werden regelmäßig und unabhängig überwacht. Die Angaben der vorgeschriebenen Warendeklaration gehen über die Pflichtangaben der düngemittelrechtlichen Kennzeichnung hinaus. Auf diese Weise wird die Anwendung

nach guter fachlicher Praxis gesichert und Schäden durch fehlerhafte Anwendungen vermieden.

Kasten 3 Landwirtschaftliche Kompostanwendung: Entscheidungsfindung Kompost



A 4.2 Anwendungsregeln

Ein nachhaltiger Komposteinsatz mit hoher Anwendungssicherheit hängt - neben der Einhaltung aller Prüfkriterien nach Punkt A 4.1 als Voraussetzung - wesentlich davon ab, dass die Komposte *nach erprobten Regeln eingesetzt* werden. Im Kompostabschlussprojekt wurden dazu alle maßgebenden Rahmenbedingungen überprüft und mit Erfahrungen praktischer Landwirte sowie der aktuellen Fachliteratur abgeglichen.

Im Ergebnis sind folgende **Regeln für eine nachhaltige Kompostanwendung** im landwirtschaftlichen Pflanzenbau zu beachten (vgl. Kasten 4).

Maßgebend für die **Höhe der Kompostgabe** ist nach Dünge-Verordnung die *Gewährleistung ausgeglichener Nährstoffsalden* im Rahmen von Fruchtfolgerotationen. Dabei dürfen die Obergrenzen lt. Bioabfall-Verordnung von 20 bzw. 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus nicht überschritten werden. Entsprechend den „Regeln guter fachlicher Praxis“ bewegen sich optimale Gaben, bei denen Positivsalden an Phosphor und Kalium kaum auftreten, um 20 t/ha TM entsprechend etwa 30 - 40 t/ha FM. Bei ungünstigen Bodenverhältnissen (Strukturprobleme usw.) sind höhere Kompostgaben bis zur Obergrenze von 30 t/ha TM, im Ausnahmefall auch höher, sinnvoll, um eine zügige Bodenverbesserung zu erreichen.

Die **Zufuhren der Kernnährstoffe Phosphor und Kalium** sind in der Düngebilanz auf Grund ihrer nachweislich guten Düngewirkung *stets voll anzurechnen*, um Positivsalden zuverlässig zu vermeiden. Der unvermeidliche Positivsaldo an Magnesium (die Zufuhr übersteigt die geringeren Pflanzenentzüge stets) ist, wie die Projektergebnisse zeigten, kein Nachteil, weil er der permanenten Mg-Auswaschung entgegenwirkt und auch für eine allmähliche Anhebung der pflanzenverfügbaren Mg-Bodengehalte sorgt.

Um optimale Ernteerträge zu gewährleisten, müssen Kompostgaben stets mit einer N-Ergänzungsdüngung (mineralisch und/oder organisch) kombiniert werden, weil der düngewirksame N-Anteil von Komposten sehr gering ausfällt. Der in der Düngebilanz **jährlich anrechenbare N-Anteil der N-Gesamtzufuhr mit den Kompostgaben** beträgt bei kurzfristiger Kompostanwendung im Mittel nur maximal 3 % (in günstigen Fällen, z.B. hohe lösliche N-Gehalte des Kompostes, bis zu 10 %). Bei langjährigem regelmäßigem Komposteinsatz sind höhere anrechenbare N-Anteile von jährlich 5 - 12 % (in günstigen Fällen bis zu 20 %) zu veranschlagen.

Deshalb ist ein N-Positivsaldo, der über die zulässige Höhe lt. Dünge-Verordnung hinaus geht, unvermeidlich. Er ist aus Sicht des Boden- und Gewässerschutzes aber tolerierbar, weil 60 - 80 % der N-Zufuhr mittelfristig im Humus gebunden bleiben und nur allmählich mineralisiert werden. Das belegen nicht nur die gering ansteigenden $N_{\min}$ -Gehalte, sondern auch die nachgewiesenen zunehmenden Anteile an inertem Stickstoff N_{inert} des Bodens nach regelmäßiger Kompostanwendung. Im Nährstoffvergleich sind die o.g. jährlich anrechenbaren N-Anteile der N-Gesamtzufuhr¹⁷, die bei regelmäßiger Kompostanwendung allmählich ansteigen, entsprechend zu berücksichtigen. Der verbleibende N-Positivsaldo aus der Kompostanwendung ist als *unvermeidlicher Überschuss* gemäß §5 (3) Anlage 6 (Zeile 15) Dünge-Verordnung zu bewerten. Es steht dabei außer Frage, dass dieser N-Überhang durch geeignete pflanzenbauliche Maßnahmen niedrig zu halten ist¹⁸.

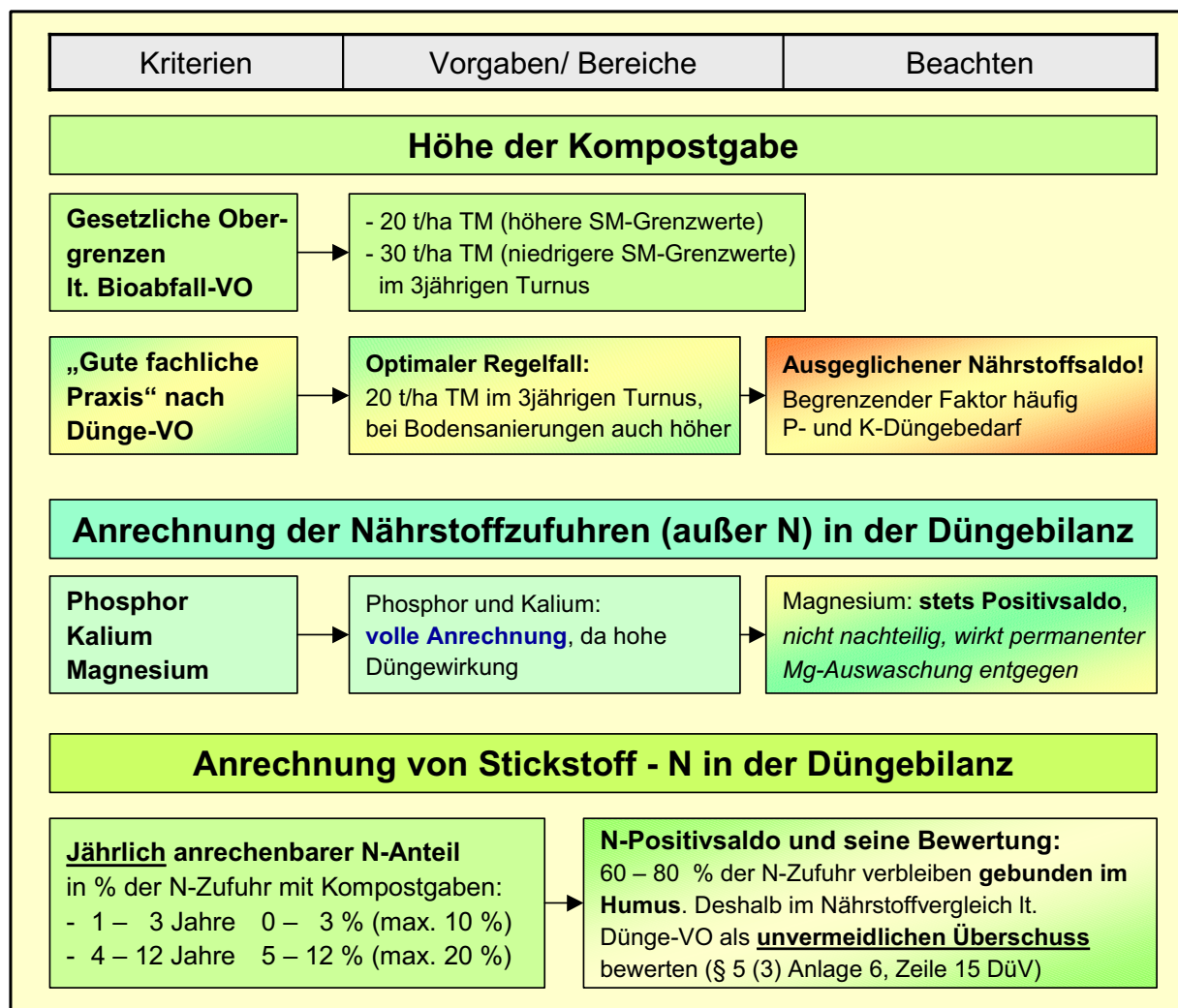
Für die praktische Kompostanwendung haben sich folgende **Anwendungstermine und verfahrenstechnische Hinweise** bewährt (vgl. Tabelle 10):

¹⁷ Sie beinhalten jeweils den löslichen N-Anteil sowie den zunehmend steigenden N-Anteil, der sich aus der Mineralisierung der organischen Substanz (Humus) ergibt.

¹⁸ Der N-Überschuss lt. Dünge-Verordnung bezieht sich nur auf den N-Düngebedarf der Pflanze. Faktisch bleibt aber der größere Teil der N-Gesamtzufuhr mit den Kompostgaben in der organischen Substanz gebunden und geht über die Humusreproduktion allmählich in den Humusgehalt des Bodens ein. Dieser „N-Überhang“ ist als notwendige Bedarfsposition zu bewerten und nicht mit dem düngewirksamen N-Überschuss lt. Dünge-Verordnung gleichzusetzen.

Die Kompostapplikation sollte *grundsätzlich zu Beginn der Vegetation* erfolgen. Dabei ist die gute Befahrbarkeit der Ackerflächen ausschlaggebend, um Bodenverdichtungen durch ungünstige Bedingungen (z.B. zu nasse Böden) zu vermeiden. Als zweckmäßige **Anwendungstermine** eignen sich für Getreidearten und Hackfrüchte Termine vor der Aussaat bzw. vor dem

Kasten 4 Regeln für die nachhaltige Kompostanwendung im landwirtschaftlichen Pflanzenbau: Höhe der Kompostgabe und Anrechnung der Nährstoffzufuhren



Pflanzen. Zu Wintergetreide bzw. zu Zwischenfrüchten ist zu gewährleisten, dass in Zeiten geringer Nährstoffaufnahme (Herbst/ Winter) keine erheblichen, zur Auswaschung neigenden Nährstoffüberhänge, vor allem an Stickstoff, entstehen. Frischkomposte mit weiteren C/N-Verhältnissen sind deshalb für die Herbstausbringung besonders geeignet, da sie in der Winterperiode zeitweilig löslichen Stickstoff binden und vor Auswaschung bewahren und damit für die im Frühjahr anlaufende Wachstumsperiode konservieren können.

Länger anhaltende Frostperioden im Zeitraum Januar - Februar haben sich als sehr geeignet erwiesen, um auf dem Wege der *Frostausbereitung* den Kompost rechtzeitig und gut verteilt sowie ohne die Gefahr bedenklicher Bodenverdichtungen auszubringen. Außerdem bewirkt die

durch die Kompostauflage dunklere Bodenoberfläche, dass sich der Oberboden bei zunehmender Sonneneinstrahlung im Frühjahr schneller erwärmt und damit das Pflanzenwachstum befördert. Aus diesem Grund wird dem Ordnungsgeber empfohlen, die für Kalkdünger bestehende Ausnahme vom Verbot der Aufbringung auf gefrorene und schneebedeckte Böden gemäß § 3 (5) Satz 2 Düng-Verordnung auch auf Komposte auszudehnen.

Unter den **verfahrenstechnischen Hinweisen** zur Kompostanwendung stehen die Ausbringungsintervalle im Vordergrund. In der landwirtschaftlichen Praxis wird die *kumulierte Ausbringung* von bis zu 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus aus Kosten- und Verfahrensgründen der Regelfall sein, weil sie niedrige Ausbringungskosten und vor allem die *möglichst geringe Befahrung* der Ackerflächen gewährleistet. Zudem entsprechen die dabei ausgebrachten düngewirksamen Zufuhren an Phosphor und Kalium einer Vorratsdüngung, die bei der Grunddüngung üblich ist.

Pflanzenbaulich ist die kumulierte Kompostanwendung aber, wie die Dauerversuche gezeigt haben, kaum von Vorteil. Die einmalig hohen Kompostgaben verursachen im Anwendungsjahr erhebliche Nährstoffüberschüsse und damit auch erhöhte Auswaschungsrisiken. Die erste Frucht erhält zudem eine unnötige „Luxusversorgung“ an Nährstoffen, während die Versorgung der Folgefrüchte geringer ausfällt. Eine jährliche Kompostanwendung, die sich in den Dauerversuchen als überlegen erwiesen hat, ist allerdings kaum praktikabel. Als Kompromiss ist, sofern aus Kostengründen tragbar, eine Kompostanwendung im 2jährigen Turnus zu empfehlen.

Tabelle 10 Regeln für die nachhaltige Kompostanwendung im landwirtschaftlichen Pflanzenbau: Geeignete Anwendungstermine und verfahrenstechnische Regeln

Kriterien	Regeln	Beachten
Geeignete Anwendungstermine		
▪ vor der Saat bzw. vor dem Pflanzen	– Wintergetreide/Zwischenfrüchte: August - September – Silo-/Körnermais: März - April – Kartoffeln/Zuckerrüben: Februar - März	Frischkomposte für Herbstausbringung geeignet: Bindung von Rest-Stickstoff in der Winterperiode
▪ Frostausbringung	Januar - Februar Wintergetreide: Applikation auf bestockten Bestand problemlos	Vorteile: keine Bodenverdichtung, schnellere Bodenerwärmung
Verfahrenstechnische Hinweise		
▪ Ausbringungsintervalle	– kumuliert alle 3 Jahre Vorteil: Senkung Ausbringungskosten – jährlich bzw. 2jährig Vorteil: kontinuierlichere Zufuhr der Nähr- und Wertstoffe, ausgeglichene Nährstoffsalden, nachhaltigere Wirkung	Mögliche Nachteile kumulierter Ausbringung: Diskontinuierliche Zufuhr an Wert- und Nährstoffen, zur 1. Frucht Nährstoffüberschüsse und Auswaschungsgefahr, geringere Versorgung der Folgefrüchte
▪ Ausbringungsverfahren	– flach einarbeiten (5 - 10 cm) – bei Erosionsgefahr: auch Mulchaufbringung ohne Einarbeitung	Kompost nicht einpflügen! Problem: Fäulnis, Wurzelschädigung

Als **Ausbringungsverfahren** haben sich in der Praxis übliche Techniken bewährt, wie sie auch für die Applikation von festen Wirtschaftsdüngern verwendet werden. Komposte sollten grundsätzlich nur *flach eingearbeitet* werden (maximal 5 - 10 cm), um die zügige Umsetzung unter Luftzufuhr zu fördern. Eine tiefe Einarbeitung (Pflugfurche) ist zu vermeiden, da unter anaeroben Verhältnissen Fäulnisprozesse gefördert werden, die die Wurzeln schädigen können. Zur Verhinderung von Bodenerosionen hat es sich auch bewährt, Kompost nur als *Mulchauflage ohne Einarbeitung* aufzubringen.

A 5 Nachhaltige Kompostanwendung - Abschlussbewertung

Die langjährigen Kompost-Anwendungsversuche haben objektiv belegt, dass Komposte mit ihrer kombinierten Wirkung als Humus- und Nährstofflieferanten einen wertvollen und nachhaltigen Beitrag zur Bodenverbesserung und zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit leisten können.

Im Vergleich zu anderen organischen Ressourcen (z.B. flüssige Wirtschaftsdünger, Gärrückstände, unbehandelte Pflanzenabfälle) erweisen sich qualitativ hochwertige Komposte als "die beste Option". Sie sind ihnen auf Grund ihrer zuverlässigen Hygienisierung, ihrem hohen Anteil an stabilen Humusformen, der guten Düngewirkung bei Phosphor und Kalium sowie ihrer Kalkwirkung im Hinblick auf Bodenverbesserung und Förderung der Bodenfruchtbarkeit in der Regel deutlich überlegen. Auch die möglichen Risiken beim Einsatz von Komposten - das haben die langjährigen Praxisversuche zweifelsfrei gezeigt - sind heute insgesamt gering und kalkulierbar und stehen einer umweltgerechten Verwertung nicht im Wege. Voraussetzung für eine nachhaltige Kompostanwendung ist allerdings stets, dass die erprobten Regeln „guter fachlicher Praxis“ konsequent eingehalten werden.

Komposte haben sich bei der Humusreproduktion der Ackerböden als besonders leistungsfähig erwiesen. Ihre Bedeutung für den landwirtschaftlichen Pflanzenbau wird voraussichtlich noch steigen, auch angesichts des steigenden Bedarfes an organischen Düngern (z.B. zunehmende Umstellung auf den Anbau von „Energiepflanzen“ mit hoher Humuszehrung, wie Mais), weil die Ressourcen an organischer Substanz für eine nachhaltige Humusreproduktion der Ackerböden durch die zunehmende Konkurrenz der Nutzung zur Energiegewinnung immer knapper werden.

Die Nutzbarmachung von Recyclingdüngern aus der Kreislaufwirtschaft, wie Komposten, wird nicht zuletzt auch deshalb immer wichtiger, weil die Kosten für Handelsdüngemittel in den letzten Jahren, verursacht durch steigende Energiekosten (Stickstoffproduktion) und Verknappung natürlicher Ressourcen (vor allem Phosphat), stetig angestiegen sind und auch in Zukunft weiter ansteigen werden. Essenziell ist die Führung im Kreislauf bei Phosphat, weil es für diesen Nährstoff, im Unterschied zur Energie, keine Alternativen gibt.

Abschließend ist es ist deshalb ein Gebot der wirtschaftlichen und ökologischen Vernunft, Komposte vor allem im landwirtschaftlichen Pflanzenbau einzusetzen, weil sie die Anforderungen an eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft optimal erfüllen.

B Planung und Ablauf des Forschungsprojektes

B 1 Einleitung und Zielstellung

Die seit Jahren verfolgte Zielstellung der bundesdeutschen Umweltpolitik, geeignete Bioabfälle vorrangig stofflich zu verwerten (*Verwertungsgebot*), hat unverändert hohe Priorität. Nur durch intensive Anstrengungen, Stoffkreisläufe im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (BUNDESGESETZBLATT 1994) soweit als möglich zu schließen, kann der zunehmenden Verknappung volkswirtschaftlich wichtiger Wertstoffressourcen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit in Gartenbau und Landwirtschaft wirkungsvoll begegnet werden. Neben der Schonung endlicher Nährstoffreserven, vor allem an Phosphor, geht es heute zunehmend darum, die Humusgehalte der Garten- und Ackerböden durch Zuführen an organischer Substanz auf ausreichend hohem Niveau zu halten, um ihre Nutzungsfähigkeit zur Erzielung hoher und qualitativ hochwertiger Ernten langfristig zu gewährleisten.

Professionell hergestellte Komposte haben sich in den letzten Jahren unter den infrage kommenden Bioabfällen zunehmend als gut geeignete Ressource erwiesen, den hohen Bedarf der landwirtschaftlich genutzten Böden an organischer Substanz - neben traditionellen Quellen, wie der Stallmist- sowie der Stroh- und Gründüngung - zu decken. Sie werden, wie praktische Erfahrungen zeigen, verstärkt zur Bodenverbesserung und Düngung eingesetzt, vor allem in Regionen, in denen heute andere organische Dünger, wie z.B. Stallmist, fehlen. Komposte sind deshalb inzwischen bei Einhaltung der Vorgaben der Düngemittel-Verordnung (BUNDESGESETZBLATT 2003) als *organische NPK-Dünger* anerkannt. Maßgebend dazu beigetragen hat die Gütesicherung von Komposten nach RAL-Gütezeichen 251, mit der homogenere Qualitäten, insbesondere eine zuverlässige Hygienisierung und die weitgehende Freiheit von Fremd- und Störstoffen erreicht werden konnte.

Entscheidend für die landbauliche Verwertung der Komposte ist allerdings - wie für alle geeigneten Bioabfälle -, dass die *Prinzipien der Nachhaltigkeit* zuverlässig eingehalten werden. Das heißt, Komposte müssen einen messbaren Nutzen für die Pflanzenproduktion und/oder die Bodenfruchtbarkeit erbringen (*Nutzenaspekte*) und gleichzeitig alle Belange des Boden- und Umweltschutzes sowie des Verbraucherschutzes mittel- und langfristig gewährleisten (*Risikoabwägung*).

Dies erkennend hat das Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg schon im Jahre 1995 die Anlage von Kompost-Anwendungsversuchen veranlasst. Ziel dieser zukunftsweisenden Entscheidung war es, in einem ganzheitlichen Projektansatz alle maßgebenden pflanzenbaulichen und ökologischen Aspekte der Kompostverwertung unter realen Praxisbedingungen wissenschaftlich zu prüfen. Anlass dazu waren auch noch offene Fragen, vor allem zum Schutz wichtiger natürlicher Ressourcen, wie der Böden und des Grundwassers, die in Wissenschaft und Praxis damals teilweise noch kontrovers diskutiert wurden.

In den Jahren 2000 - 2002 war im Rahmen eines Verbund-Forschungsprojektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) eine erste umfassende Auswertung der Kompostversuche vor-

genommen worden. Im abschließend erarbeiteten DBU-Forschungsbericht 2003 (ANONYM 2003A) wurden neben den bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Grundlagen auch wesentliche ökologische und ökonomische Aspekte der Kompostanwendung bis hin zu Fragen einer effektiven Kompostvermarktung bearbeitet. Im Ergebnis dieses Berichtes konnten zahlreiche Diskussionen um das Für und Wider der landwirtschaftlichen Kompostverwertung als geklärt betrachtet werden. Der Bericht hat auch heute noch in seinen wesentlichen Aussagen Bestand.

Die fünf einheitlich angelegten Kompost-Anwendungsversuche in Baden-Württemberg wurden im Jahre 2006 planmäßig beendet. Damit liegen für drei Standorte 12jährige und für zwei Standorte 9jährige Untersuchungsergebnisse vor - eine für bundesdeutsche Verhältnisse einmalige Versuchs- und Ergebnisbasis.

Nach Abschluss der Kompostversuche war es das **Ziel des Abschlussprojektes**, aufbauend auf den Ergebnissen des DBU-Verbund-Forschungsprojektes,

- eine umfassende Untersuchung und -auswertung der Kompostversuche vorzunehmen, in der alle maßgebenden pflanzenbaulichen, bodenkundlichen und ökologischen Aspekte der Kompostanwendung abschließend geprüft werden,
- mit Hilfe der Ergebnisse der zusätzlichen Versuchsjahre die Aussagen und Bewertungen des DBU-Projektberichtes 2003 zu validieren und
- die früher erarbeiteten Anwendungsrichtlinien für den nachhaltigen Komposteinsatz bei Bedarf zu präzisieren.

Hinweise zur Nutzung des Abschlussberichtes

Der vorliegende Abschlussbericht wurde unter Berücksichtigung folgender Grundsätze erarbeitet:

- Der Bericht ist als Ergebnisbericht aufgebaut, dessen Resultate und Aussagen vor allem der praktischen Nutzung dienen sollen. Er ist deshalb, im Unterschied zu dem umfassenden wissenschaftlichen DBU-Projektbericht 2003 (ANONYM 2003A), deutlich knapper gefasst. Auf ausführliche Dokumentationen wird verzichtet, sofern nicht neue, über den Bericht 2003 hinausgehende Erkenntnisse vorliegen.
- Hinsichtlich der wissenschaftlichen Validierung der Ergebnisse wird auf der umfassenden Literaturrecherche des DBU-Projektberichtes 2003 (Punkt B 2.1) aufgebaut, die auch heute noch voll gültig ist. Neuere Literatur wird nur berücksichtigt (vgl. Punkt D), wenn sie für die Beurteilung der Ergebnisse wesentlich und relevant ist.
- Im Bericht werden überwiegend komprimierte Darstellungen der Ergebnisse vorgestellt. Einzelergebnisse sind dem ausführlichen Anhang zu entnehmen.
- Der methodische Teil wurde durchweg knapp gehalten. Ausführlichere Angaben sind dem DBU-Projektbericht 2003 zu entnehmen.

B 2 Konzeption und Arbeitsziele

Die Recherche zum Wissenstand über die landbauliche Verwertung von Komposten (vgl. DBU-Verbund-Forschungsprojekt 2003, Punkt B 2.1) zeigte, dass bisher zwar zahlreiche Einzelaspekte herausgearbeitet worden sind, eine umfassende Bewertung der pflanzenbaulichen Wirkungen sowie der möglichen Anwendungsrisiken aber überwiegend nur ansatzweise vorgenommen worden ist. Insbesondere der Aspekt der Nachhaltigkeit, der langjährige Feldversuche erfordert, konnte in früheren Untersuchungen selten ausreichend berücksichtigt werden.

Die Grundlage der Kompost-Anwendungsversuche bildete deshalb eine ganzheitliche Konzeption, die alle wesentlichen pflanzenbaulichen Anforderungen („Regeln guter fachlicher Praxis“) mit maßgeblichen Belangen des Umweltschutzes (Boden- und Gewässerschutz) sowie letztlich auch des Verbraucherschutzes verknüpft (vgl. Abbildung 2). Sie baut auf dem wissenschaftlichen Standpunkt des VDLUFA (VDLUFA 1996) und weiteren ökosystemaren Konzepten auf, mit denen eine objektive Bewertung der Kompostwirkungen in der Landwirtschaft möglich ist. Nur diese komplexe Herangehensweise gewährleistet letztlich eine nachhaltige, d.h. langfristig umweltverträgliche Verwertung der Komposte im Landbau.

Der **innovative ganzheitliche Ansatz des Projektes** wird in folgenden Arbeitszielen deutlich (vgl. Abbildung 3):

- Erfassung aller maßgebenden Vorteilswirkungen (Düngung, Bodenverbesserung u.a.) und ihre Abwägung mit möglichen Risikoaspekten (Schadstoffe, Störstoffe u.a.) mit Hilfe von langjährigen Kompost-Anwendungsversuchen (Versuchs-Monitoring) und
- daraus resultierende Präzisierung von „Regeln guter fachlicher Praxis“ mit dem Ziel, die Bedingungen für die nachhaltige, d.h. umweltgerechte Kompostanwendung in der Landwirtschaft konkreter und umfassender als bisher herauszuarbeiten.

Dieser **integrative und vor allem praxisbezogene Ansatz** unterscheidet das Projekt von früher bearbeiteten Projekten zur landbaulichen Kompostverwertung:

- Durchführung der langjährigen Kompost-Anwendungsversuche auf landwirtschaftlich genutzten Flächen unter ausschließlicher Verwendung gütegesicherter, d.h. qualitativ hochwertiger Komposte.
- Bildung sogenannter „Tandem-Teams“ an den Versuchsstandorten, bestehend aus Landwirten und Kompostbetrieben mit Gütesicherung in den ausgewählten Regionen Baden-Württembergs.
- Aktive Einbindung der Landwirte und Kompostbetriebe in das Projekt, um zu gewährleisten, dass die Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen durch Erfahrungen der Praktiker validiert und ergänzt werden.

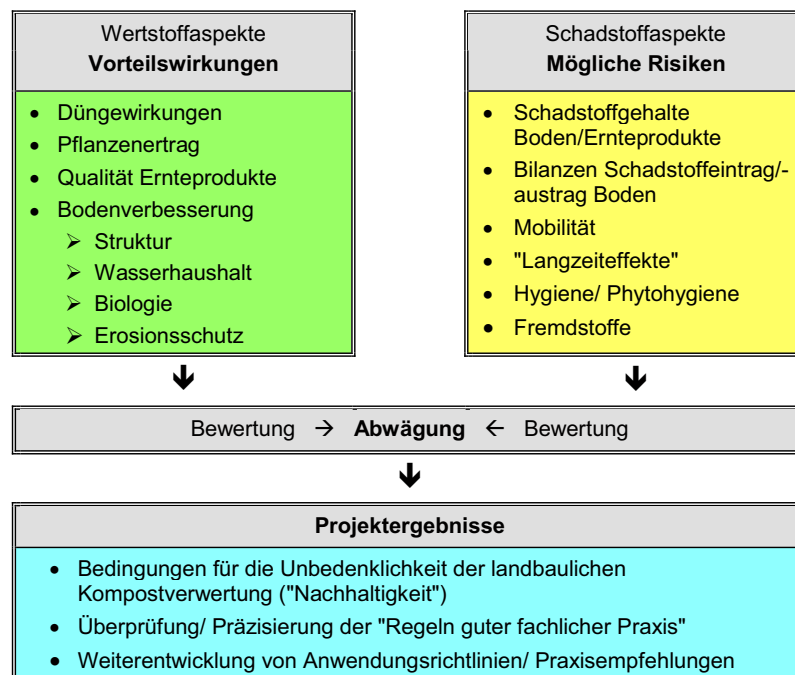


Abbildung 2 Modell der objektiven Bewertung von Kompostwirkungen in der Landwirtschaft

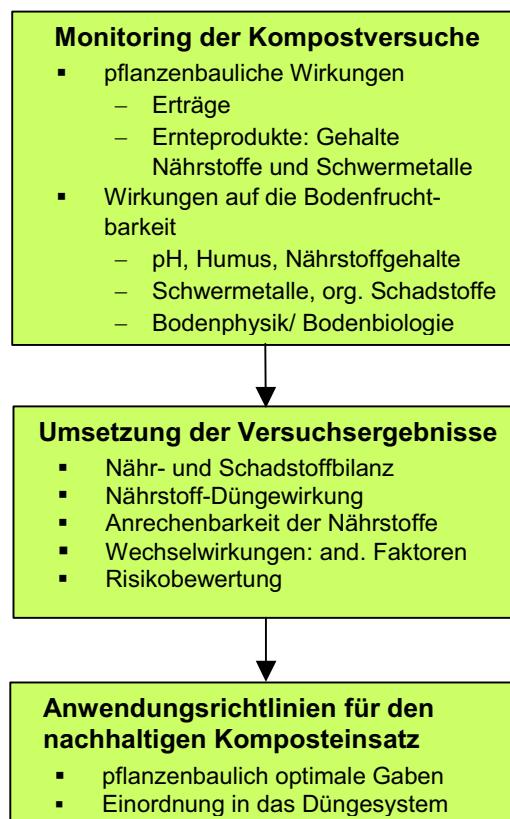


Abbildung 3 Ganzheitlicher Ansatz des Forschungsprojektes

B 3 Material und Methoden

B 3.1 Inhaltsstoffe von Komposten

Eine möglichst umfassende Kenntnis aller maßgebenden Inhaltsstoffe von Komposten bildet die Grundlage für die objektive Bewertung ihrer Vorteilswirkungen und möglichen Risiken.

Komposte im Sinne des vorliegenden Berichtes sind stets (Definition)

vorwiegend aus Bioabfällen (Obst-, Gemüse- und Speisereste) in Kombination mit Grünabfällen (*Bioabfallkomposte*) bzw. ausschließlich aus pflanzlichen Abfällen (*Grüngutkomposte*) durch aerobe Heißrotte unter Nutzung mikrobieller Abbauvorgänge hergestellte, hygienisierte und auf eine bestimmte Korngröße (10 bis max. 40 mm) abgesiebte Biomaterialien mit einem verbliebenen Gehalt an organischer Substanz von etwa 30 - 50 % in der Trockenmasse, die einer *Gütesicherung nach RAL-Gütezeichen 251* unterliegen.

Für die Bewertung der Inhaltsstoffe von Komposten wurde eine bundesweite Stichprobe der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. - BGK - herangezogen (BGK 2007). Sie umfasste ca. 5.700 Kompostproben, die im Rahmen der bundesweiten Gütesicherung nach RAL-Gütezeichen 251 in den Jahren 2004 und 2005 untersucht wurden.

B 3.2 Kompost-Anwendungsversuche

B 3.2.1 Versuchsstandorte

Im Sinne der ganzheitlichen Konzeption (vgl. Punkt B 2) waren bei der **Auswahl der Versuchsstandorte in Baden-Württemberg** folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Auswahl von landwirtschaftlich genutzten Flächen mit suboptimalen Bodenbedingungen, auf denen die Kompostanwendung Vorteile für die Bodenfruchtbarkeit und das Pflanzenwachstum erwarten lässt (*Kompostanwendung nur bei Bedarf*).
- Repräsentation typischer landwirtschaftlicher Regionen in Baden-Württemberg mit charakteristischen Boden- und Klimabedingungen, die auch bundesweit übertragbar sind (*Beispielsversuche für die Region*).
- Sicherung einer langjährigen Versuchsdurchführung, um die weitgehende Annäherung an Gleichgewichte der Kompostwirkung im Boden zu erreichen (*Langzeitwirkungen von Komposten*).
- Versuche möglichst unter Bildung sogenannter „Tandem-Teams“, d.h. der Verbindung zwischen praktischen Landwirten und gewerblichen Kompostbetrieben in der Region (*hoher Praxisbezug der Versuchsergebnisse*).

- Anwendung ausschließlich von gütegesicherten, d.h. qualitativ hochwertigen Komposten mit dem Ziel, „Regeln guter fachlicher Praxis“ unter diesen Bedingungen zu überprüfen und zu präzisieren (*Verbindung von pflanzenbaulichen Vorteilswirkungen mit ökologischen Anforderungen*).

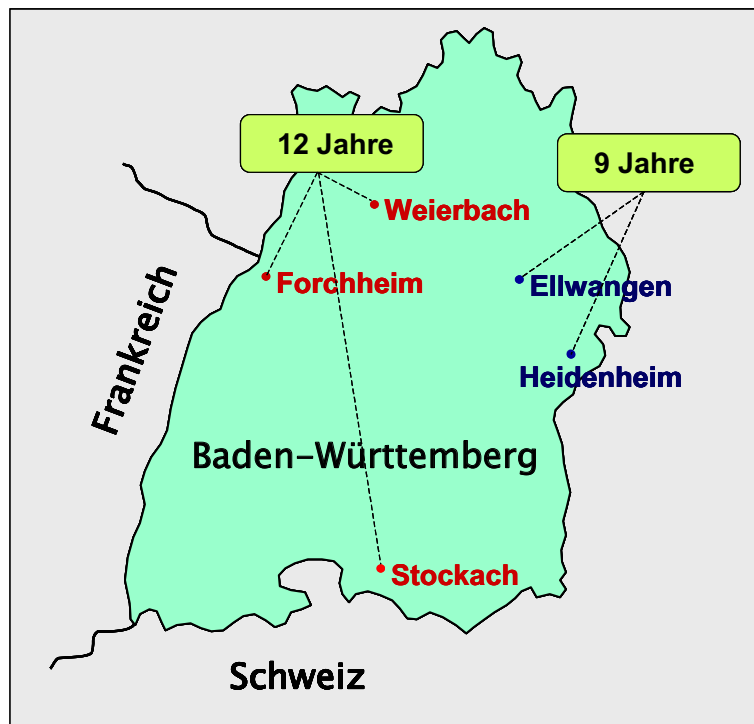


Abbildung 4 Kompost-Anwendungsversuche in Baden-Württemberg mit 9jähriger bzw. 12jähriger Laufzeit

Versuchsbasis

Für das Forschungsprojekt standen insgesamt fünf Kompost-Anwendungsversuche auf typischen Ackerstandorten in Baden-Württemberg zur Verfügung (vgl. Abbildung 4). Drei der Versuche wurden im Jahre 1995 begonnen, zwei Versuche wurden 1998 angelegt. Damit verfügte das Forschungsprojekt über eine außerordentlich fundierte, inzwischen schon langjährige Versuchsbasis, die bundesweit einmalig ist.

Die Versuche wurden überwiegend auf mittleren und schweren Böden (vier Standorte) angelegt, auf denen eine positive Kompostwirkung auf Grund suboptimaler Bodenbedingungen (Neigung zur Verdichtung, Vernässung usw.) vorrangig zu erwarten ist. Ein Standort (Forchheim) ist repräsentativ für leichte sandige Böden mit kiesigem Untergrund, die unter den quasi mediterranen Klimabedingungen der Rheinebene verstärkt starken Schwankungen des Wasserhaushaltes ausgesetzt sind. Die Versuchsstandorte sind für verschiedene landwirtschaftliche Regionen der Bundesrepublik repräsentativ.

Eine komprimierte Übersicht zu den Versuchsstandorten und weiteren relevanten Angaben vermittelt Tabelle 11. Einzelheiten zur Charakterisierung der Böden sowie zu den Witterungsbedingungen der Standorte, der Herkunft der Komposte vgl. Anhang 1, Tabellen 1-01 bis 5-01 „Allgemeine Versuchsunterlagen“.

Tabelle 11 Standortbeschreibung, eingesetzte Kompostarten und Laufzeit der Versuche

Nr.	Standort		Region	Boden- art	Tongehalt %	Kompostart	Laufzeit (a)
1	Forchheim	Fo	Rheinebene	IS	10	Bioabfall	12
2	Weierbach	We	Kraichgau	uL	27	Grüngut	12
3	Stockach	St	Hegau	utL	26	Bioabfall	12
4	Ellwangen	El	Ostalb	utL	29	Bioabfall	9
5	Heidenheim	He	Ostalb	uL	27	Bioabfall	9

B 3.2.2 Versuchsplanung

Ziel der Kompost-Anwendungsversuche war es, Unterlagen sowie Richt- und Anhaltswerte für

- pflanzenbaulich optimale Kompostgaben,
- die Anrechenbarkeit der Kompost-Nährstoffe sowie weiterer Nährstoffe in der Düngebilanz,
- bodenphysikalische und -biologische Wirkungen und
- die Wirkung der Kompostgaben auf Schwermetallgehalte in Böden und Ernteprodukten

zu gewinnen.

Dazu wurde ein **einheitlicher Versuchsplan für alle Standorte** erarbeitet. Die 12 Versuchsvarianten (vgl. Tabelle 12) ergeben sich aus der vollständigen Kombination der beiden Faktoren „Kompostgabe“ (vier Stufen) und „ergänzende mineralische N-Düngung“ (drei Stufen). Bei randomisierter Anlage als zweifaktorielle Spaltanlage mit je vier Wiederholungen/Versuchsvariante umfassten die Versuche jeweils 48 Parzellen a 60 m².

Staffelung der Kompostgaben

Um weitere Hinweise über die optimale Höhe der Kompostgaben zu gewinnen, wurden die Kompostgaben in den Versuchen wie folgt gestaffelt:

- Stufe **K0**: ohne Kompostgabe als Kontrolle für die Kompostprüfvarianten,
- Stufe **K1** als sog. „halbe Optimalgabe“ mit dem Ziel zu prüfen, ob auch bereits niedrige Kompostgaben zu pflanzenbaulichen Vorteilswirkungen führen können,
- Stufe **K2** als sog. „Optimalgabe“, deren Größenordnung aktuelle Obergrenzen lt. Bioabfall-Verordnung (BUNDESGESETZBLATT 1998) nicht übersteigen darf und die sich an den begrenzenden Faktoren der Nährstoffzufuhr (vor allem P und K) lt. Dünge-Verordnung (BUNDESGESETZBLATT 2007) orientiert

und

- Stufe **K3** als sog. „Extremgabe“, mit der geprüft werden soll, ob eventuell auch höhere Gaben ohne Schaden für Böden und Grundwasser eingesetzt werden könnten. Diese Variante dient vor allem zur Absicherung der „Optimalgabe“.

Nach diesem Versuchsplan mit fixen Kompostgaben wurden die Versuche seit 2001 über zwei Fruchtfolgerotationen bis zum Versuchsabschluss 2006 geführt. Im Zeitraum 1998 - 2000 wurden die fixen Kompostgaben kumuliert für drei Jahre im Jahre 1998 aufgebracht. Im Zeitraum 1995 - 1997 wurden die Kompostgaben an der Höhe der damit verbundenen N-Gesamtzufuhr ausgerichtet. Die Abweichungen vom endgültigen Versuchsplan hatten keine merklichen Auswirkungen auf die Versuchsergebnisse.

Tabelle 12 Einheitlicher Versuchsplan der Kompost-Anwendungsversuche

Var.-Nr.	Versuchsfaktoren		Var.-Kürzel
	fixe Kompostgabe jährlich in t/ha TM	mineralische N-Düngung jährlich in % des Optimums	
1	ohne	ohne	K0N0
2	ohne	50	K0N1
3	ohne	100	K0N2
4	5	ohne	K1N0
5	5	50	K1N1
6	5	100	K1N2
7	10	ohne	K2N0
8	10	50	K2N1
9	10	100	K2N2
10	20	ohne	K3N0
11	20	50	K3N1
12	20	100	K3N2

Anm.: ¹ jährliches N-Düngungsoptimum der angebauten Fruchtart, ermittelt nach Nitratinformationsdienst

Staffelung der ergänzenden N-Düngung

Ein wesentliches Versuchsziel war, konkrete Angaben zu den N-Anteilen der N-Gesamtzufuhr mit den Kompostgaben zu gewinnen, die für die Düngung angerechnet werden können und die damit die notwendige N-Ergänzungsdüngung mindern. Deshalb wurde über alle Kompoststufen eine Spanne von einer fehlenden zusätzlichen N-Gabe (Stufe N0) über eine halbierte optimale N-Gabe (Stufe N1 = 50 %) bis zur optimalen N-Gabe (Stufe N2 = 100 %) gelegt. Die Grundlage für die Bemessung der optimalen N-Düngergabe (Stufe N2) bildeten die aktuellen Regeln der N-Düngerbemessung.

Einheitliche Fruchtfolgerotationen

Als Fruchtfolge wurde - einheitlich über alle Versuchsstandorte - die Folge Mais¹⁹/ W.Weizen/ W.Gerste gewählt und im gesamten Versuchszeitraum eingehalten. Diese Fruchtfolge repräsentiert eine für Baden-Württemberg häufige Fruchtrotation mit mittleren bis hohen Nährstoffentzügen. Sie ist auch auf zahlreiche Landwirtschaftsbetriebe im Bundesgebiet übertragbar.

¹⁹ In Abhängigkeit von den regionalen Klimabedingungen wurde auf den Versuchen Forchheim und Weierbach jeweils Körnermais und auf den Versuchen Stockach, Ellwangen und Heidenheim Silomais angebaut.

Der **wesentliche Vorteil der einheitlichen Versuchsplanung des Forschungsprojektes** - einheitliche Versuchsvarianten, einheitliche Fruchtfolge, Einsatz von gütegesicherten Komposten, dazu auf Praxisstandorten (Ausnahme Versuch Forchheim) - besteht darin, dass *praxisnahe Forschungsergebnisse mit guter Vergleichbarkeit für unterschiedliche Standorte und Komposte* erreicht wurden und damit eine sehr gute Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse gewährleistet werden konnte.

B 3.2.3 Versuchsdurchführung

Das **jährlich durchzuführende Versuchsprogramm** gestaltete sich im allgemeinen wie folgt:

- Aussaat der Versuchskultur,
- Einmessen der Versuchspartzen,
- Ausbringung der Kompostgaben lt. Versuchsplan,
- Behandlungsmaßnahmen im Vegetationsverlauf (N-Düngung, Pflanzenschutz),
- Bonituren (Wachstumsauffälligkeiten, Wuchshöhe, Bestandesdichte, Unkrautbesatz, Befall mit Krankheiten und Schädlingen) und
- Ermittlung des Ernteertrages je Parzelle (Haupt- und Nebenernteprodukte).

Die **Probenahmen** auf den Feldversuchen hatten zum Ziel,

- eine möglichst vollständige Bilanz der Zufuhr und Abfuhr an Nähr- und Schadstoffen zu erstellen,
- mögliche Veränderungen maßgeblicher agrochemischer, physikalischer bzw. biologischer Parameter des Bodens zu erfassen und darauf aufbauend
- eine am Stoffkreislauf orientierte ökologische und pflanzenbauliche Bewertung der Kompostanwendung im landwirtschaftlichen Pflanzenbau vorzunehmen.

Die **Probenahmen für die agrochemischen Untersuchungen** erfolgten im allgemeinen nach folgendem Schema:

- Kompostproben zur Untersuchung auf maßgebliche Inhaltsstoffe jährlich vor der Ausbringung,
- Bodenproben vor Versuchsanlage zur Erfassung des Ausgangszustandes sowie nach Versuchsabschluss zur Erfassung des Endzustandes: Mischproben (Versuchsblock bzw. Varianten) aus drei Tiefen (0 - 30, 30 - 60, 60 - 90 cm),
- Bodenproben jährlich nach der Ernte (Parzellenproben aus 0 - 25 cm Tiefe),
- N_{min}-Bodenproben (Varianten-Mischproben) jährlich:
 - im Frühjahr vor der ersten N-Düngung (Ermittlung des N-Düngebedarfes),
 - nach der Ernte,
 - zum SchALVO - Termin (November) (BADEN-WÜRTTEMBERG 2001)
- Ernteproben jährlich je Parzelle (Haupt- und Nebenernteprodukte)

Die **Probenahmen für die bodenphysikalischen und bodenbiologischen Untersuchungen** erfolgten durchweg nach speziellen, durch die Untersuchungsmethodik vorgegebenen Terminen und Verfahren. Sie werden im methodischen Teil entsprechend ausgewiesen.

Weiterführende Details zur Versuchsanlage, den angebauten Fruchtarten und Sorten, der Höhe der Kompostgabe sowie der mineralischen N-Düngung der Versuche vgl. Anhang 1, Tabellen 1-01 bis 5-01 „Allgemeine Versuchsunterlagen“.

B 3.2.4 Beteiligte Projektpartner

Für die fünf, gemäß Punkt B 3.2.1 ausgewählten Versuchsstandorte der Kompost-Anwendungsversuche (vgl. auch Tabelle 11) wurden in den jeweiligen Regionen sog. „Tandem-Teams“ aus einem Kompostbetrieb, der den gütegesicherten Kompost bereitstellte, und einem Erwerbslandwirt als Kompostverwerter gebildet (vgl. Tabelle 13). Diese direkte Praxisanbindung der Versuche gewährleistete eine hohe praxisbezogene Bearbeitung der Projektaufgaben.

B 3.3 Untersuchungen

B 3.3.1 Agrochemische Untersuchungen

B 3.3.1.1 Komposte

Die Untersuchungen erfolgten nach den Methoden der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK 2006) und in Anlehnung an das VDLUFA-Methodenbuch Band I, in Einzelfällen auch nach Hausmethoden der ehem. LUFA Augustenberg (vgl. Tabelle 14).

B 3.3.1.2 Böden

Alle agrochemischen Bodenuntersuchungen erfolgten nach VDLUFA-Methodenbuch Band I, in Einzelfällen auch nach anderen Methoden. An ausgewählten Varianten der Kompost-Anwendungsversuche wurden zum Versuchsabschluss umfangreiche Untersuchungen auf organische Schadstoffe vorgenommen (vgl. Tabelle 15).

B 3.3.1.3 Pflanzen

In den Ernteprodukten (Korn, Stroh und Silomais) der Kompost-Anwendungsversuche wurden nach Aufschluss des Pflanzenmaterials mit konzentrierter Salpetersäure jeweils die Gesamtgehalte an Nährstoffen (N, P, K, Mg) und Schwermetallen (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu, Zn, Hg) untersucht. Alle Untersuchungen erfolgten in Anlehnung an Methoden für Düngemittel gemäß VDLUFA-Methodenbuch Band II.

Tabelle 13 Liste der beteiligten „Tandem-Teams“ der Versuche

Nr.	Versuchs-standort	Komposthersteller	Kompostverwerter
1	Forchheim	Kompostbetrieb Franz Vogel Industriestraße 51 76532 Baden-Baden	Landesanstalt für Pflanz- bau Forchheim Kutschenweg 20 76287 Rheinstetten
2	Weierbach	1995 - 2000: Amt für Abfallwirtschaft der Stadt Karlsruhe, Kompostanlage Neureut Ottostraße 21, 76227 Karlsruhe Ab 2001: Frank GmbH, Im See 4 76703 Kraichtal-Neuenbürg	Landwirt Friedbert Keller Weierbachsiedlung 76703 Kraichtal
3	Stockach	Kompostwerk Landkreis Konstanz GmbH Otto-Hahn-Straße 1 87224 Singen	Landwirt Thomas Martin Im Grund 20 78359 Orsingen- Nenzingen
4	Ellwangen	1998 -2005 Gesellschaft des Ostalbkreises für Ab- fallwirtschaft GmbH, Kompostanlage Ellert, Graf-von-Soden-Straße 7 73527 Schwäbisch Gmünd 2006 Kompostanlage Mergelstetten	Landwirt Kurt Ritter Hermannsfeld 73527 Schwäbisch Gmünd
5	Heidenheim	Kreisabfallwirtschaftsbetrieb Heiden- heim, Kompostanlage Mergelstetten, Schmittenplatz 5, 89522 Heidenheim	Landwirt Ernst Häckel Ernst-Schreiber-Str. 27 89542 Herbrechtingen

B 3.3.2 Bodenphysikalische und -biologische Untersuchungen

An drei Versuchsstandorten (Forchheim, Stockach, Heidenheim) wurden jeweils Bodenproben von ausgewählten Versuchsvarianten 3, 9 und 12 entnommen und auf solche bodenphysikalischen und -biologischen Parameter untersucht, mit denen die Wirkungen von Kompostgaben möglichst quantitativ charakterisiert werden können. Zu den ausgewählten Parametern und den Untersuchungsmethoden vgl. Tabelle 16.

B 3.3.3 Ergebnisauswertung und -darstellung

Die Ergebnisse der Übersichtsuntersuchungen zu **Inhaltsstoffen von Komposten** der Jahre 2004 und 2005 wurden von der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. in ausgewerteter Form übernommen. Sie liegen jeweils als Mittelwerte (arithmetisches Mittel sowie Median) und Spannweiten (10. und 90. Quantil, Minimum und Maximum) der Stichproben vor. Für die fünf

Kompost-Anwendungsversuche liegen Einzelergebnisse der Komposte aus den jeweiligen Versuchsjahren vor.

Zu allen, in den **Kompost-Anwendungsversuchen geprüften Parametern**, wie Ernteerträgen, agrochemischen Parametern (Boden- und Pflanzengehalten) an Nährstoffen und Schwermetallen, wurden im Rahmen des DBU-Projektes bis zum Versuchsjahr 2002 statistische Mittelwertvergleiche der Versuchsvarianten mit Hilfe des DUNNETT-Testes durchgeführt.

Tabelle 14 Parameter und Untersuchungsmethoden für Komposte

Parameter	Methodenherkunft	Kapitel/Punkt/Nr.
Allgemeine Parameter		
Trockensubstanz	BGK-Methodenbuch	Kapitel II A 1
Volumengewicht	BGK-Methodenbuch	Kapitel II A 4
Organische Substanz	BGK-Methodenbuch	Kapitel III B 1.1
Salzgehalt	BGK-Methodenbuch	Kapitel III C 2
pH-Wert	BGK-Methodenbuch	Kapitel III C 1
Rottegrad	BGK-Methodenbuch	Kapitel IV A 1
Unkrautsamenbesatz	BGK-Methodenbuch	Kapitel IV B 1
Fremdstoff- und Steingehalt	BGK-Methodenbuch	Kapitel II C 1 und C 2
Gesamtgehalte Nährstoffe		
Stickstoff	DIN ISO	13878:1998-11
Phosphor, Kalium, Magnesium (Königswasseraufschluss)	BGK-Methodenbuch	Kapitel III A 1.2
Basisch wirksame Substanz	BGK-Methodenbuch	Kapitel III B 2.1
Lösliche Nährstoffgehalte		
Stickstoff und Magnesium (CaCl ₂ -Extrakt)	VDLUFA-Methodenbuch, Bd. I	Punkte A 6.1.3.1 und A 6.2.4.1
Phosphor und Kalium (CAL-Extrakt)	VDLUFA-Methodenbuch, Bd.	Punkt A 6.2.1.1
Gesamtgehalte Schwermetalle (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu, Zn, Hg) (Königswasseraufschluss)	BGK-Methodenbuch	Kapitel III C 4.1.1
Organische Schadstoffe		
PCB	LUFA-Hausmethode in Anlehnung an Kompostmethoden	Kapitel 4, Punkt 8.3
PCDD/F	LUFA-Hausmethode in Anlehnung an Kompostmethoden	Kapitel 4, Punkt 8.1
Mikrobiologische Parameter		
Salmonella	BGK-Methodenbuch	Kapitel IV C 1
Aerobe Bakterien, fäkalkoliforme Bakterien, Pilze	LUFA-Hausmethode	

Tabelle 15 Agrochemische Parameter und Untersuchungsmethoden für Böden

Parameter	Methodenherkunft	Kapitel/Punkt/Nr.
Humusgehalt (C-Gehalt x 1,72)	DIN ISO	10694
N-Gesamtgehalt	DIN ISO	13878:1998-11
pH-Wert	VDLUFA- Methodenbuch, Bd. II	Punkt A 5.1.1
Gesamtgehalte Schwermetalle (Pb, Cd, Cr, Ni, Hg, Cu, Zn) (Königswasseraufschluss)		Punkt A 2.4.3.1
Lösliche Nährstoffgehalte		
Stickstoff und Magnesium (CaCl ₂ -Extrakt)	VDLUFA- Methodenbuch Bd. I	Punkte A 6.1.3.1 und A 6.2.4.1
Phosphor und Kalium (CAL-Extrakt)	VDLUFA- Methodenbuch Bd. I	Punkt A 6.2.1.1
N _{min} -Gehalt	LUFA-Hausmethode nach SchALVO	
Heißwasserlöslicher Stickstoff und Kohlenstoff	VDLUFA- Methodenbuch Bd. I	Punkt A 4.3.2
Organische Schadstoffe		
PCB	VDLUFA- Methodenbuch Bd. VII	Methode 3.3.2.1
PCDD/F	Hausmethode	
Organochlorpestizide	VDLUFA- Methodenbuch Bd. VII	Methode 3.3.2.1
PAK	VDLUFA- Methodenbuch Bd. VII	Methode 3.3.3.1
Phthalate	Hausmethode mit GC- MS	Aufarbeitung wie VDLUFA-Methode Bd VII Methode 3.3.2.1
Organozinnverbindungen	nach Normenentwurf ISO/DIS 23161	
Nonylphenole	nach ISO Horizontal - 13.1 August 2006 fifth draft	
Polyzykl. Moschusverbindungen	UBA-Projektbericht vgl. ANONYM (2005)	UBA-Berichts-Nr. UBA-FB 001017
Bisphenol A	Nach VDLUFA- Methodenbuch Bd. VII	Methode 3.3.6.
Chlorphenole	VDLUFA- Methodenbuch Bd. VII	Methode 3.3.6.1

Für die Versuchsjahre 2004 - 2006 wurden jeweils die arithmetischen Varianten-Mittelwerte und bestimmte Spannweiten (Quantile) errechnet, mit denen eine für praktische Zwecke ausreichende Beurteilung der Kompostwirkungen möglich ist.

Tabelle 16 Bodenphysikalische und -biologische Parameter und Methoden

Parameter	Methode	Methodenherkunft
Bodenphysikalische Parameter		
Aggregatstabilität	Tauchsiebung lufttrockener Aggregate ($\varnothing$ 1-2 mm in Wasser)	DIN 19683-16
Lagerungsdichte (Rohdichte trocken, ρ_t)	Quotient aus der Trockenmasse und Nennvolumen (100 cm ³) von Stechzylinderproben	DIN 19683-12
Kornrohdichte, ρ_s	Flüssigkeitspyknometrie, Suspensionsmedium Wasser	DIN ISO 11508
Porenvolumen (Porenanteil, PA)	Berechnung aus ρ_t und ρ_s	DIN 19683-13
Porenverteilung	Bestimmung des volumetr. Wassergehaltes (zunächst wassergesättigte Proben nach Entwässerung bei bestimmten Druckstufen)	VDLUFA I, C 4.3.1 und C 4.3.2
Wassergehalt	Trocknung bei 105 °C	VDLUFA I, C 1.1.1
Feldkapazität, FK	Volumetr. Wassergehalt von Stechzylinderproben (Saugspannung von 63 hPa bei pF 1,8)	DIN 4220
Nutzbare Feldkapazität, nFK	Differenz der volumetr. Wassergehalte bei Feldkapazität und am permanenten Welkepunkt (Saugspannung 1,5 MPa = pF 4,2)	DIN 4220
Wasserleitfähigkeit, kf	Messung der Wasserperkolations durch Stechzylinderproben	DIN 19683-9
Luftkapazität, LK	Differenz zwischen PA und FK	DIN 4220
Wasserhaltekapazität, WK	Hausmethode in Anlehnung an	DIN 14240-2, Anhang A
Bodenbiologische Parameter		
mikrobielle Biomasse	Substratinduzierte Respiration nach Heinemeyer et al. (1989)	DIN 14240-1
N-Mineralisation	Bestimmung der N-Mineralisation im anaeroben Brutversuch	Schinner et al. 1993
Alkalische Phosphatase	Bestimmung der Phosphomonoesterase-Aktivität bei alkalischem pH-Wert	Schinner et al. 1993

Die **Ergebnisse der heißwasserlöslichen Bodengehalte an Kohlenstoff und Stickstoff** wurden als Varianten-Mittelwerte dargestellt und mit Hilfe des Newman-Keuls-Testes varianzanalytisch ausgewertet.

Die **Ergebnisse der bodenphysikalischen und -biologischen Untersuchungen** der ausgewählten Versuchsvarianten 3, 9 und 12 wurden in der Regel als arithmetische Mittelwerte mit ihren Standardabweichungen dargestellt. Zudem erfolgte eine varianzanalytische Auswertung der Mittelwert-Differenzen der ausgewählten Varianten auf der Grundlage des t-Testes.

C Ergebnisse

C 1 Übersichtsuntersuchungen zu Inhaltsstoffen von Komposten

Die Grundlage für die nachfolgende Beurteilung der Qualität von Komposten bilden umfangreiche repräsentative Stichproben von Komposten (vgl. Punkt B 3.1), die im Rahmen der freiwilligen Qualitätsüberwachung des RAL-Gütezeichens 251 der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. -BGK- in Kompostbetrieben der Bundesrepublik Deutschland im Zeitraum 2004 und 2005 erhoben worden sind (BGK 2007).

C 1.1 Wertgebende Inhaltsstoffe

C 1.1.1 Gehalte

Als maßgebende wertgebende Inhaltsstoffe (vgl. Tabelle 17) sind der **Gehalt an organischer Substanz** von im Mittel 35 - 45 % TM, der **Gehalt an basisch wirksamen Stoffen** von im Mittel 3 - 6 % TM und die **Nährstoff-Gesamtgehalte** zu nennen. Letztere bewegen sich im Mittel um

Stickstoff (N)	1,2 - 1,6 % TM
Phosphor (P ₂ O ₅)	0,5 - 0,7 % TM
Kalium (K ₂ O)	0,8 - 1,3 % TM
Magnesium (MgO)	0,5 - 0,9 % TM.

Sie erlauben je nach Gehalt überwiegend eine Einstufung gemäß Düngemittel-Verordnung (BUNDESGESETZBLATT 2003) als **organische NPK- bzw. NP-Dünger**. Die Gehalte in Grün-
gutkomposten fallen dabei, wie frühere Recherchen gezeigt haben (ANONYM 1999), im Mittel um 20 - 30 % niedriger aus als in Biokomposten.

Die **löslichen Anteile der Nährstoff-Gesamtgehalte** von Komposten schwanken in weiten Grenzen (vgl. Tabelle 18). Die löslichen Stickstoffanteile bewegen sich überwiegend deutlich unterhalb von 10 %, bei Grünkomposten sogar nur um 1 - 3 % der N-Gesamtgehalte, Ausdruck für eine geringe und langsame Mineralisierung der organisch gebundenen N-Gehalte. Bei **Kohlenstoff/Stickstoff (C/N)-Verhältnissen** von im Mittel 15 - 17/1 ist aber mittelfristig eine relativ gute Stickstoffdüngewirkung zu erwarten. Die Gesamtgehalte von Phosphor bzw. Kalium sind - im Unterschied zu Stickstoff - mit löslichen Anteilen von im Mittel 15 - 25 % bzw. 65 - 70 % überwiegend pflanzenverfügbar und damit in der Düngebilanz voll anrechenbar einzustufen (vgl. Punkt C 2.2.1.6). Der lösliche Anteil von Magnesium fällt dagegen mit im Mittel 7 - 10 % des Gesamtgehaltes relativ niedrig aus.

Tabelle 17 Inhaltsstoffe von Bio- und Grünkomposten (BGK 2007)
Ergebnisse der bundesweiten Gütesicherung nach RAL-Gütezeichen 251 der
Jahre 2004 und 2005, Größe der Stichprobe ca. 5.700 Kompostproben

Parameter		Mittelwerte		Quantile ¹			
		arith. Mittel	Median ²	10.	20.	80.	90.
<i>Allgemeine Parameter</i>							
Trockenmasse	% FM ³	64,1	64,0	52,1	56,1	72,0	76,4
Rohdichte	g/l FM	652	650	480	540	760	820
Salzgehalt	g/l FM	5,0	4,5	1,7	2,4	7,2	8,6
pH-Wert		7,5	7,6	6,7	7,0	8,1	8,3
Fremdstoffe > 2 mm	% TM ⁴	0,15	0,09	0,01	0,02	0,24	0,37
Steine > 5 mm	% TM	1,63	1,27	0,23	0,50	2,56	3,50
Unkrautsamen	A ⁵ /l FM	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Nährstoff-Gesamtgehalte in % TM</i>							
Stickstoff	N	1,41	1,39	0,85	1,00	1,79	1,98
Phosphor	P ₂ O ₅	0,68	0,64	0,36	0,44	0,88	1,03
Kalium	K ₂ O	1,09	1,07	0,57	0,71	1,44	1,64
Magnesium	MgO	0,78	0,70	0,34	0,44	1,04	1,30
<i>Lösliche Nährstoffgehalte in mg/l FM</i>							
Stickstoff insg.	N	332	253	27	72	534	704
davon Ammonium	NH ₄ -N	248	145	2	11	446	619
Phosphor	P ₂ O ₅	1.049	985	458	620	1.407	1.684
Kalium	K ₂ O	3.642	3.421	1.720	2.230	4.902	5.814
Magnesium	Mg	233	216	146	169	284	328
<i>Weitere wertgebende Inhaltsstoffe in % TM</i>							
Org. Substanz		38,4	37,4	24,5	28,6	46,7	52,0
C ⁷ /N-Verhältnis		17,0	15,4	11,7	12,7	19,5	22,3
BWS ⁸	CaO	4,54	4,04	1,94	2,50	6,27	7,70
<i>Schwermetallgehalte in mg/kg TM</i>							
Blei	Pb	44,8	40,6	23,4	28,2	58,3	70,5
Cadmium	Cd	0,47	0,42	0,25	0,31	0,60	0,74
Chrom	Cr	23,9	22,0	13,7	16,0	29,2	35,0
Nickel	Ni	15,0	13,1	6,7	8,4	19,2	24,0
Kupfer	Cu	50,3	46,3	28,1	33,5	65,1	78,5
Zink	Zn	183	173	122	139	221	259
Quecksilber	Hg	0,15	0,12	0,06	0,08	0,18	0,24

Erläuterungen:

¹ Quantil - Spannweite der Stichprobe. Das 10., 20., 80. bzw. 90. Quantil beinhalten 10, 20, 80 bzw. 90 % aller Einzelwerte der Stichprobe

² Median - 50 % aller Einzelwerte der Stichprobe

³ FM - Frischmasse

⁴ TM - Trockenmasse

⁵ A/l FM - Anzahl/Liter FM

⁶ Lösliche Nährstoffgehalte: N und Mg - CaCl₂-Extrakt, P₂O₅ und K₂O - CAL-Extrakt

⁷ C-Gehalt - 58 % des Gehaltes an organischer Substanz

⁸ BWS - basisch wirksame Stoffe

Tabelle 18 Größenordnungen der löslichen Nährstoffanteile von Komposten

Nährstoff		Lösliche Nährstoffgehalte in % der Gesamtgehalte			
		Mittel		Spannweite	
Stickstoff	N	3	- 5	1	- 10
Phosphor	P ₂ O ₅	15	- 25	10	- 40
Kalium	K ₂ O	65	- 70	50	- 85
Magnesium	MgO	7	- 10	5	- 15

C 1.1.2 Frachten

Die beste Information über die pflanzenbaulich geeignete Höhe der Kompostgaben vermittelt der **Saldo der Frachten an Wertstoffen** (organische Substanz, Kalk, Nährstoffe) zwischen der Zufuhr durch die Kompostanwendung und dem Bedarf des Bodens an organischer Substanz und Kalk bzw. der Nährstoffabfuhr durch die Ernteprodukte. Lt. Dünge-Verordnung (BUNDES-GESETZBLATT 2007) müssen vor allem die Nährstoffsalden mittelfristig ausgeglichen sein. In einem zweiten Schritt ist die **Wirkung der Wertstoffzufuhren auf die Bodenfruchtbarkeit und den Ertrag** zu prüfen, siehe dazu Punkte C 2.2 bis C 2.5.

C 1.1.2.1 Organische Substanz und basisch wirksame Substanz (BWS)

Schon mit moderaten Kompostgaben von 20 t/ha TM im 3jähr. Turnus (entspr. jährlich 6,7 t/ha TM) werden dem Boden erhebliche Mengen an **organischer Substanz** zugeführt (vgl. Tabelle 19). Sie betragen im Mittel jährlich 2,4 - 2,8 t/ha TM und können bei Maximalgaben von 30 t/ha TM im 3jähr. Turnus (entspr. jährlich 10 t/ha TM) Werte um jährlich 3,6 - 4,0 t/ha TM erreichen. Diese Zufuhren bilden eine zunehmend wertvollere Ressource für die Humusreproduktion und Bodenverbesserung. Sie sind deshalb vor allem für viehlos wirtschaftende Marktfuchtbetriebe von Interesse.

Inwieweit die Zufuhr von organischer Substanz durch Kompostgaben den Humusbedarf von Böden decken und damit die **Humusbilanz** positiv beeinflussen kann, zeigt eine Saldierung (vgl. Abbildung 5):

Von der Gesamtzufuhr an Kohlenstoff (C) von jährlich 1,5 - 2,2 t/ha werden bei Fertigkomposten etwa 50 %, d.h. jährlich etwa 0,8 - 1,1 t/ha C kurzfristig Humus-reproduktionswirksam (BGK 2005). Mittlere Böden haben bei noch optimalen Humusgehalten bei mittlerem Verbrauch einen Humusbedarf von jährlich etwa 0,3 t/ha C, bei hohem Verbrauch von jährlich etwa 0,7 t/ha C. Bei suboptimalen Humusgehalten steigt der C-Bedarf deutlich auf Werte um 0,5 - 1,4 t/ha C.

Der Saldo zeigt - und die Humusgehalte der Böden belegen das auch (vgl. Punkt C 2.2.1.2) -, dass mit mittleren bis hohen Kompostgaben der Humusbedarf von Böden mindestens gedeckt und die **Humusbilanz insgesamt positiv beeinflusst** werden kann.

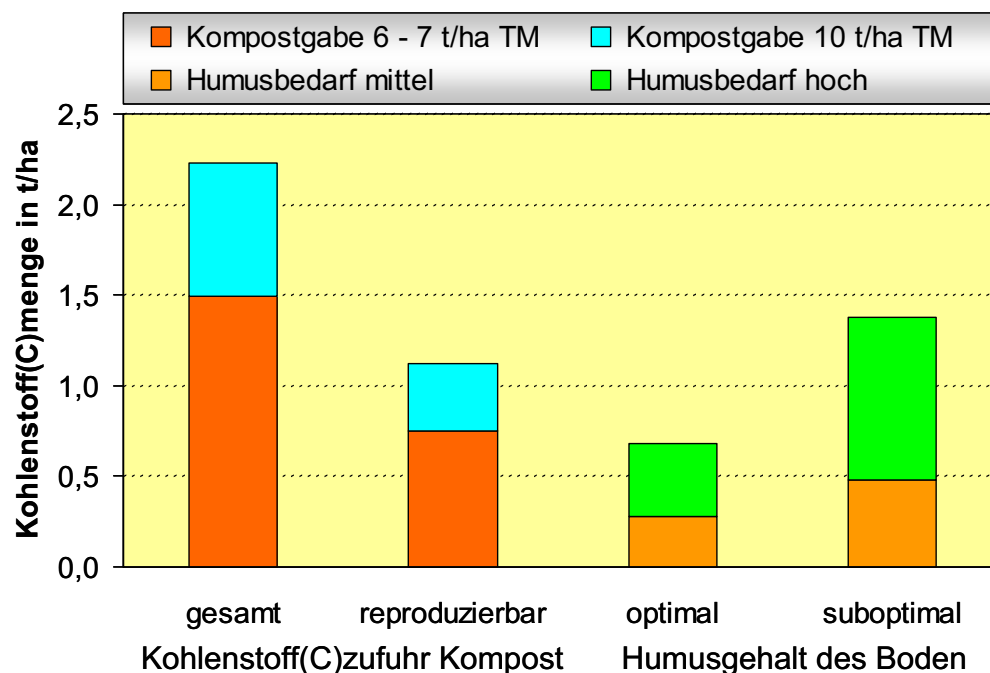


Abbildung 5 Jährlicher Saldo von Zufuhr an organischer Substanz (OS) durch Kompostgaben und dem Humusbedarf von Böden (Mittelwerte), bezogen auf Kohlenstoff (C)

Legende: Zufuhren an organischer Substanz, berechnet aus arithmetischen OS-Mittelwert der Übersichtsuntersuchungen lt. Tabelle 17

- Gesamtzufuhr an Kohlenstoff(C): 58 % der Zufuhr an org. Substanz (OS)
- davon reproduzierbar und kurzfristig wirksam: 51 %

Kompostgaben: mittel 20 t/ha TM*3a entspr. jährlich 6,7 t/ha TM
hoch 30 t/ha TM*3a entspr. jährlich 10 t/ha TM

Humusbedarf Böden:

- mittlerer Verbrauch: Fruchtfolge K.Mais/ W.Weizen/ W.Gerste
- hoher Verbrauch: Fruchtfolge Zuckerrübe/ W.Weizen/ W.Gerste

Humusgehalt Böden:

- optimal: nur Zufuhr an org. Substanz zur Erhaltung des Humusgehaltes
- suboptimal: erhöhte Zufuhr an org. Substanz zur Sanierung des Humusgehaltes

Auch die Zufuhr an **basisch wirksamer Substanz** mit Komposten ist beträchtlich (vgl. Abbildung 6):

Mit Gaben von jährlich 6,7 bzw. 10 t/ha TM werden etwa 2 - 4 bzw. 3 - 6 dt/ha CaO ausgebracht, bei hohen Gehalten (90. Quantil) sogar bis zu 8 - 9 dt/ha CaO. Diese CaO-Zufuhren entsprechen auf leichten bis mittleren Böden einer **Erhaltungskalkung**. Unter diesen Bedingungen ist der Saldo überwiegend ausgeglichen bis schwach positiv.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass schon aus der Saldierung der Wertstofffrachten deutlich wird, dass die beträchtliche Zufuhr an organischer Substanz die maßgebliche Vorteilswirkung der Kompostanwendung für die Humusversorgung des Bodens darstellt. Die Kalkzufuhr ist im Vergleich dazu nachrangig, aber als Erhaltungskalkung von Vorteil.

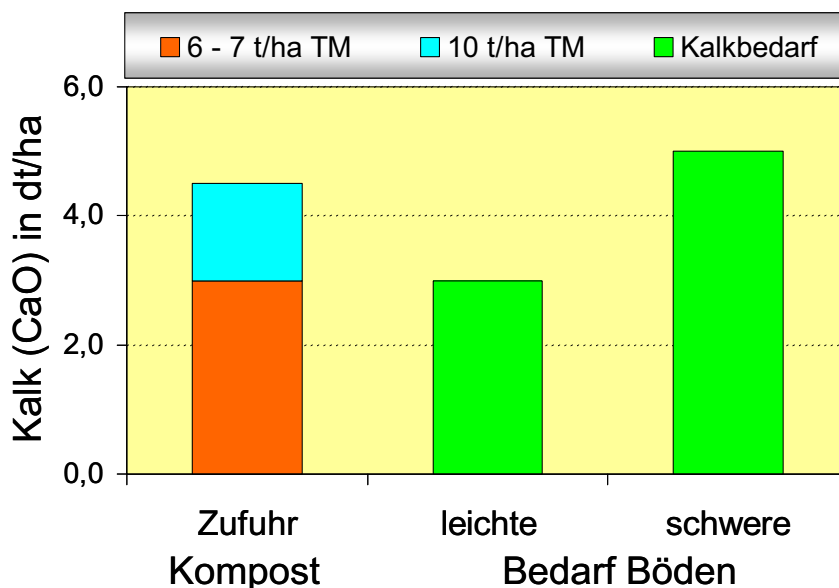


Abbildung 6 Jährlicher Saldo von Kalkzufuhr mit Kompostgaben und Kalkbedarf von Böden (Mittelwerte)

Zufuhren an Kalk (BWS): arith. Mittelwert der Übersichtsuntersuchungen lt. Tabelle 17
Kompostgaben: mittel 20 t/ha TM*3a entspr. jährlich 6,7 t/ha TM
hoch 30 t/ha TM*3a entspr. jährlich 10 t/ha TM
Kalkbedarf Böden: mittlerer Bedarf leichter bzw. schwerer Böden für Erhaltungskalkung

C 1.1.2.2 Nährstoffe

Die mittleren Nährstoffzufuhren fallen bei pflanzenbaulich geeigneten Kompostgaben von 20 bzw. 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus (entsprechend jährlich 6,7 bzw. 10 t/ha TM) erheblich aus (vgl. Tabelle 19 und Abbildung 7).

Tabelle 19 Mittlere jährliche Zufuhren an Wert- und Nährstoffen mit Kompostgaben von 20 t/ha TM im 3jährigen Turnus und ihre Bewertung für die Düngebilanz

Wertstoffe	Mittlerer Bereich	Beurteilung
Organische Substanz t/ha TM	2,4 - 2,8	positiv für Humusbilanz
Kalk - CaO dt/ha	2,0 - 4,0	positiv für Kalkbilanz
Nährstoffe kg/ha	Mittlerer Bereich	Nährstoffsaldo im Mittel
Stickstoff - N	80 - 110	schwach negativ
Phosphor - P ₂ O ₅	35 - 55	ausgeglichen
Kalium - K ₂ O	60 - 85	mittlere Entzüge: ausgeglichen hohe Entzüge: schwach negativ
Magnesium - MgO	35 - 60	stark positiv

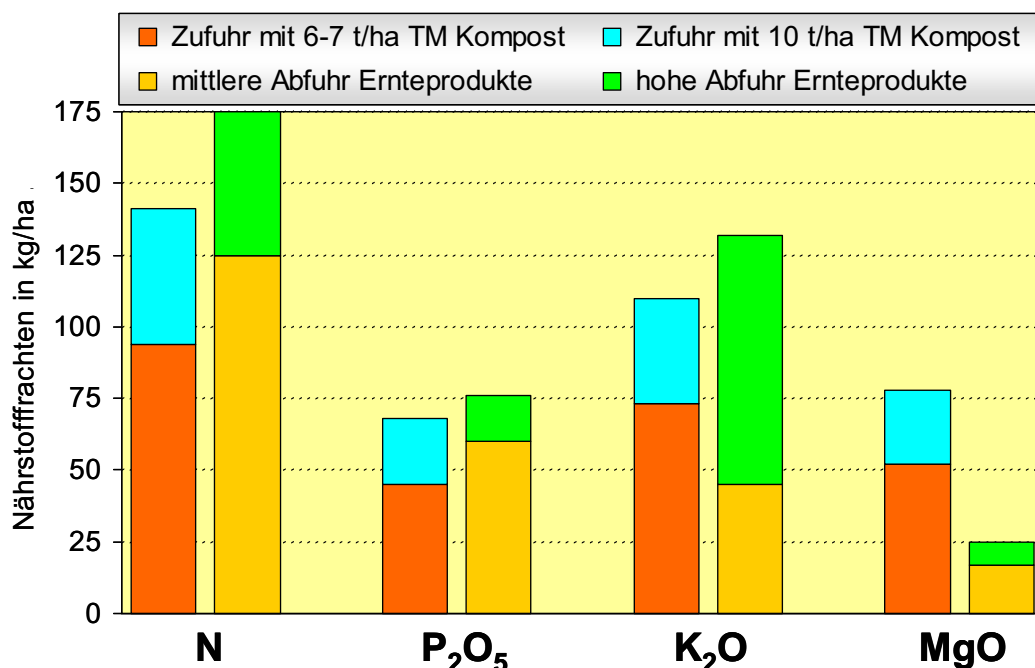


Abbildung 7 Jährlicher Saldo von Nährstoffzufuhren durch Kompostgaben und Nährstoffabfuhr durch Ernteprodukte (Mittelwerte)

Nährstoffzufuhren: arith. Mittelwerte der Übersichtsuntersuchungen lt. Tabelle 17
 Kompostgaben: mittel 20 t/ha TM*3a entspr. jährlich 6,7 t/ha TM
 hoch 30 t/ha TM*3a entspr. jährlich 10 t/ha TM
 Nährstoffabfuhr: Mittelwerte Ernteprodukte (ohne Stroh) von Fruchtfolgen mit
 mittleren Abfuhr (K.Mais/ W.Weizen/ W.Gerste) bzw. hohen
 Abfuhr (S.Mais/ W.Weizen/ W.Gerste)

Unter Zugrundelegung mittlerer Nährstoffabfuhr von Fruchtfolgen mit mittleren bzw. hohen Entzügen sind die Größenordnungen der **mittleren Nährstoffsalden** wie folgt zu beurteilen (vgl. Tabelle 19 und Abbildung 7):

- Stickstoff(N)-Saldo: schwach negativ (mittlere Kompostgabe) bis ausgeglichen (hohe Kompostgabe), große Schwankungen möglich,
- Phosphor(P₂O₅)-Saldo: im Mittel meist ausgeglichen,
- Kalium(K₂O)-Saldo: bei mittleren Abfuhr positiv, bei hohen Abfuhr negativ, große Schwankungen möglich und
- Magnesium(MgO)-Saldo: stets deutlich positiv.

Zusammenfassend zeigt die Saldierung der Nährstoffe, dass mit moderaten und vor allem maximal möglichen Kompostgaben bei allen Nährstoffen Grenzen erreicht (N, P) und im ungünstigen Fall (K geringe Entzüge, deutlich Mg) überschritten werden können, die im Sinne der Dünge-Verordnung grundsätzlich eingehalten werden müssen, um im Interesse des Boden- und Gewässerschutzes mittelfristig ausgeglichene Nährstoffsalden zu gewährleisten.

C 1.2 Unerwünschte Stoffe

C 1.2.1 Schwermetalle

C 1.2.1.1 Gehalte

Die Schwermetallgehalte von Komposten der umfangreichen bundesweiten Stichprobe (BGK 2007), ihre Mittelwerte und Spannweiten (Absolutwerte vgl. Punkt C 1.1.1, Tabelle 17), lassen sich in ihrer relativen Darstellung, d.h. der *Ausschöpfung der Grenzwerte der Bioabfall-Verordnung*, wesentlich anschaulicher beurteilen (vgl. Abbildung 8).

Danach ergibt sich folgende Situation:

Die Medianwerte der **unerwünschten Schwermetalle** Pb, Cd, Cr, Ni und Hg schöpfen die Grenzwerte²⁰ für *Kompostgaben von 20 t/ha TM* im 3jährigen Turnus zu maximal 25 - 30 %, bei Hg sogar nur zu 12 % aus. Selbst im ungünstigen Fall (90 % aller Ergebnisse der Stichprobe) werden die Grenzwerte um mindestens 50 % unterschritten. Bezogen auf die stringenteren Grenzwerte²¹ für *Kompostgaben von 30 t/ha TM* im 3jährigen Turnus bewegen sich die Medianwerte um maximal 40 - 45 % (Pb, Cd), bei Hg nur um 17 %. Für 90 % aller Proben liegen die Ausschöpfungsraten bei maximal 70 - 75 %, bei Cr und Hg deutlich darunter.

Die Cu- und Zn-Gehalte, die auf Grund ihrer gleichzeitigen Bedeutung als essenzielle Spurenelemente eine Sonderstellung einnehmen, schöpfen die Grenzwerte durchweg höher aus als die unerwünschten Schwermetalle. Die relativen Medianwerte bewegen sich um 40 - 50 % bzw. 55 - 65 % der Grenzwerte bei Kompostgaben von 20 bzw. 30 t/ha TM. Auch im ungünstigen Fall (90 % aller Proben) wird der Grenzwert für 20 t/ha TM sicher eingehalten. Bei Cu sind allerdings Grenzwertüberschreitungen möglich, wenn der stringente Grenzwert für 30 t/ha TM von 70 mg/kg TM zugrunde gelegt wird. Gründe für die höheren Ausschöpfungsraten bei Cu und Zn sind Zufuhren über Düngemittel, vor allem über Wirtschaftsdünger (Gülle), bedingt durch die Zugabe von Cu und Zn als Spurennährstoffe zu den Futtermitteln.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Gehalte der Komposte an unerwünschten Schwermetallen die Grenzwerte weit überwiegend deutlich unterschreiten und sicher einhalten. Damit ist eine wichtige Voraussetzung für den nachhaltigen Bodenschutz beim Einsatz von Komposten gewährleistet. Höhere Ausschöpfungsraten bei Cu und Zn sind tolerierbar, solange sich die aktuellen Gehalte der Böden deutlich unterhalb von nicht zu überschreitenden Vorsorgewerten bewegen und durch die geringen Zufuhren keine merkliche Anhebung der Bodengehalte erfolgt.

²⁰ absolut in mg/kg TM: Pb - 150, Cd - 1,5, Cr und Cu - 100, Ni - 50, Zn - 400, Hg - 1,0

²¹ absolut in mg/kg TM: Pb - 100, Cd - 1,0, Cr und Cu - 70, Ni - 35, Zn - 300, Hg - 0,7

C 1.2.1.2 Frachten

Die Schwermetallfrachten, die mit Kompostgaben von 20 bis maximal 30 t/ha TM im dreijährigen Turnus ausgebracht werden, schöpfen die Grenzfrachten lt. Bioabfall-VO in gleicher Größenordnung aus wie die entsprechenden Schwermetallgehalte. Überschreitungen dieser Grenzfrachten sind deshalb bei Pb, Cd, Cr, Ni, Hg und Zn im Regelfall, auch unter ungünstigen Bedingungen (mehr als 90 % aller Proben), nicht zu erwarten. Trotz der vergleichsweise hohen Cu-Frachten der Komposte ist im Mittel (Medianwerte) die gesicherte Einhaltung der Grenzfrachten gewährleistet. Bei hohen Cu-Anteilen muss mit Überschreitungen gerechnet werden.

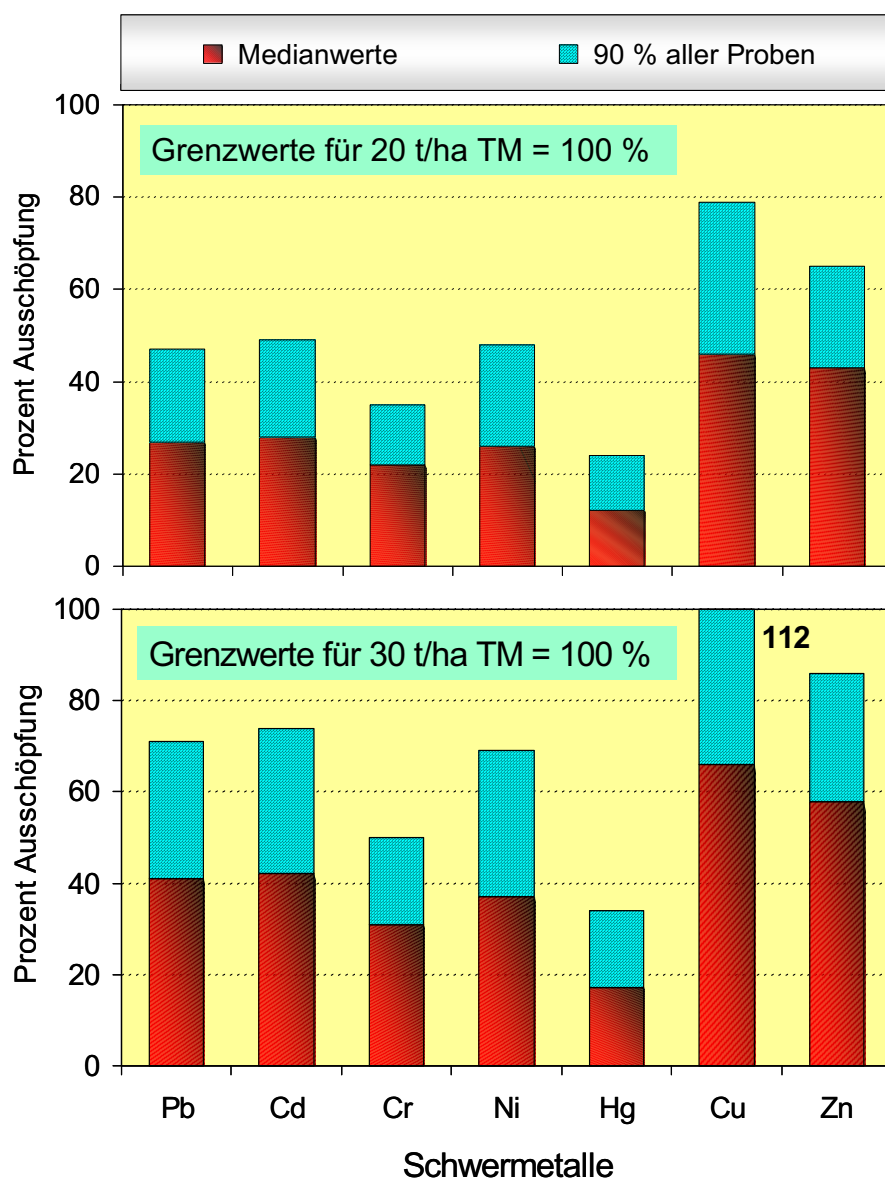


Abbildung 8 Schwermetallgehalte von Komposten relativ zu Grenzwerten der Bioabfall-Verordnung für Kompostgaben von 20 t/ha TM (oben) bzw. 30 t/ha TM (unten) im 3jährigen Turnus (Grenzwerte in mg/kg TM = 100 %)

Unter dem Gesichtspunkt, dass die Schwermetalle Cu und Zn gleichzeitig als essenzielle Spurennährstoffe der Pflanzenernährung fungieren, sind erhöhte Frachten mit Kompostgaben nicht ausschließlich als Nachteil anzusehen. Im Gegenteil, auf Böden mit unzureichender Cu- bzw. Zn-Versorgung sind solche absolut geringen Frachten unterhalb regulärer Düngergaben, wie sie mit den Kompostgaben zugeführt werden, aus Gründen der optimalen Pflanzenernährung sogar erwünscht.

Insgesamt sind die gütegesicherten Komposte, ausgehend von der repräsentativen Übersichtsuntersuchung, überwiegend für eine nachhaltige Verwertung in der Landwirtschaft geeignet. Sie erfüllen zum großen Teil das *Minimierungsgebot*, nach dem die zulässigen Grenzfrachten im Sinne eines wirksamen Bodenschutzes weitgehend zu unterschreiten sind. Letztlich wird damit die Höhe der pflanzenbaulich optimalen Kompostgabe überwiegend durch die Nährstofffrachten und nur im Ausnahmefall durch die Schwermetallfrachten begrenzt.

C 1.2.2 Organische Schadstoffe

Da zu Versuchsbeginn 1995 noch keine belastbaren Ergebnisse vorlagen, wurden im Rahmen des Projektes alle Komposte, die in den Kompost-Anwendungsversuchen eingesetzt wurden, auf Polychlorierte Biphenyle (PCB) und Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F) untersucht. Die begrenzte Stichprobe von 54 Einzelergebnissen erlaubt es, erste Aussagen über die o.g. Parameter zu treffen. Als Bewertungsgrundlage werden, mangels geeigneter Grenz- oder Bezugswerte²², die Orientierungswerte des ehemaligen Kompostierungserlasses Baden-Württemberg (BADEN-WÜRTTEMBERG 1994) herangezogen.

Die Ergebnisse (vgl. Tabelle 20) zeigen (Einzelergebnisse der Versuchsstandorte vgl. Anhang 1, Tabellen 1/02 - 5/02), dass sich die **PCB-Gehalte** der eingesetzten Komposte absolut auf einem sehr niedrigen Niveau bewegen. Sie schöpfen den Orientierungswert für PCB von 200 µg/kg TM, der seinerseits sehr niedrig angesetzt worden ist (1/6 des Grenzwertes für Klärschlämme), im Mittel zu 23 % aus, mit einer Spannweite der Komposte der Versuchsstandorte von 18 - 26 %. Nur in einem Fall (Versuch Stockach) wurde der Orientierungswert überschritten, in allen übrigen Fällen lag die Ausschöpfung bei maximal 66 %. Im Einklang mit einer aktuellen Studie des Umweltbundesamtes (ANONYM 2005) ist festzustellen, dass sich die Belastung der Komposte mit PCB auf einem absolut sehr niedrigen Gehaltesniveau bewegt und im Regelfall für die Kompostanwendung kein Problem bildet.

Die **PCDD/F-Gehalte** schöpfen den Orientierungswert von 17 ng I-TEQ/kg TM im Mittel aller Komposte zu 42 % aus, bei einer Schwankungsbreite von 31 - 54 %. Im ungünstigen Fall (Maximum) beträgt die Ausschöpfung 80 %. Auch diese absolut sehr niedrigen Gehalte, die sich nur wenig oberhalb der ubiquitären Bodenbelastung von 5 ng I-TEQ/kg bewegen, sind für die Kompostanwendung unproblematisch.

²² Bioabfall-Verordnung: keine Grenzwerte für organische Schadstoffe vorgesehen.
Grenzwerte Klärschlamm-Verordnung: auf Grund ihrer Höhe (Summe PCB - 1.200 µg/kg TM, PCDD/F - 100 ng I-TEQ/kg TM) ungeeignet.

Tabelle 20 Gehalte an PCB und PCDD/F in Komposten: Eingesetzte Komposte der Kompost-Anwendungsversuche im Zeitraum 1995 - 2006

Versuchs-standorte ²³	Gehalte			Ausschöpfung Orientierungs-werte ²⁴ in %	
	Mittelwert	Minimum/Maximum		Mittelwert	Maximum
PCB (Summe von 6 Kongeneren ²⁵) in µg/kg TM					
Fo	36	19	- 66	18	33
We	49	14	- 132	25	66
St	52	16	- 217	26	109 !
El	43	32	- 54	22	27
He	51	20	- 108	26	54
Mittel Orte	46	14	- 217	23	109 !
PCDD/F in ng I-TEQ/kg TM					
Fo	6,7	3,3	- 12,2	39	72
We	5,4	2,0	- 8,6	32	51
St	6,2	3,9	- 8,2	36	48
El	5,3	2,6	- 8,4	31	49
He	7,5	4,1	- 12,2	44	72
Mittel Orte	6,2	2,0	- 12,2	36	72

C 1.2.3 Fremdstoffe und Steine

Die Ergebnisse aktueller Übersichtsuntersuchungen von gütegesicherten Komposten zeigen (vgl. Tabelle 17 und Abbildung 9), dass die Grenzwerte der Bioabfall-Verordnung für Fremd-
stoffgehalte >2 mm sowie Steine >5 mm problemlos eingehalten werden. Das trifft auch für die
in den Kompost-Anwendungsversuchen eingesetzten Komposte zu (Einzelergebnisse vgl. An-
hang 1, Tabellen 1-02 bis 5-02), wenn auch die Mittelwerte gering höher ausfallen als in den
Übersichtsuntersuchungen. Die Komposte sind mit einem mittleren Gehalt an **Fremdstoffen**
>2 mm von <0,1 % TM praktisch frei von Fremdstoffen. Auch im ungünstigen Fall (bei 90 % al-
ler Proben - 0,37 % TM) werden die Grenzwerte deutlich unterschritten und sicher eingehalten.

Steine sind zwar in Komposten ebenfalls unerwünscht, können aber im Vergleich zu anderen
unerwünschten Stoffen als nachrangiges Risiko eingestuft werden. Sie bilden in geringen An-
teilen und kleinen Korngrößen für die Pflanzenproduktion kein Problem. In den Übersichtsun-
tersuchungen betrug der **Steinanteil >5mm** überwiegend 1,0 - 1,5 % TM. Er lag im ungünsti-
gen Fall (90. Quantil) bei etwa 3,5 % TM. In den Kompostversuchen fielen die Steingehalte ge-
ring höher aus. Der Grenzwert wurde jedoch durchweg sicher unterschritten.

²³ Fo - Forchheim, We - Weierbach, St - Stockach, El - Ellwangen, He - Heidenheim, vgl. Tabelle 11.

²⁴ Orientierungswerte lt. ehem. Kompostierungserlass Baden-Württemberg (BADEN-WÜRTTEMBERG
1994): PCB (Summe von 6 Kongeneren) - 200 µg/kg TM, PCDD/F - 17 ng I-TEQ/kg TM.

²⁵ PCB-Kongenere Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180.

Abschließend ist festzustellen, dass Fremdstoffe und Steine in gütegesicherten Komposten heute für die landwirtschaftliche Verwertung kein Risiko mehr bilden.

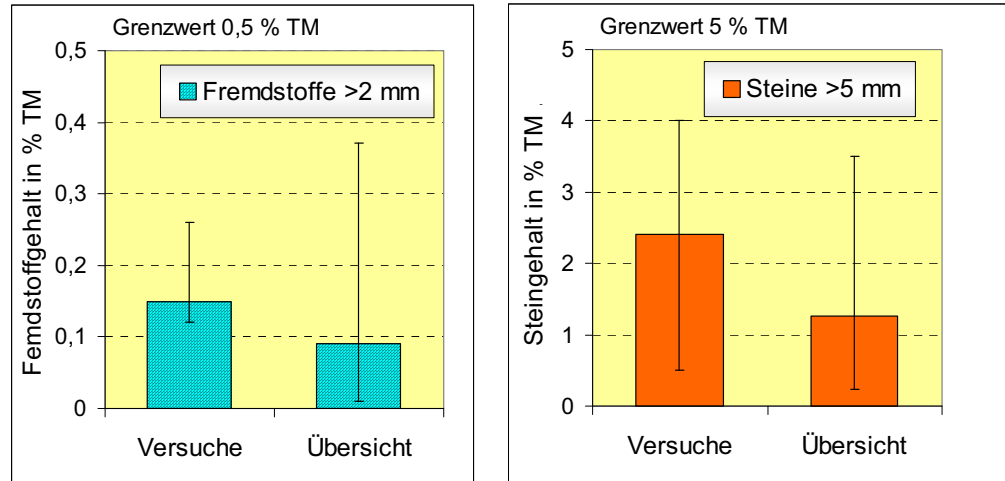


Abbildung 9 Fremdstoffgehalte >2 mm und Steingehalte >5 mm in Komposten:
 Ergebnisse der Übersichtsuntersuchungen sowie der Kompostversuche

Versuche: Balken - Mittelwert über alle Standorte und Jahre (44 Werte),
 Spannweiten - Mittelwerte der einzelnen Standorte
 Übersichtsuntersuchungen (ca. 5.700 Kompostproben vgl. Tabelle 17):
 Balken - Medianwert, Spannweiten - 10./90. Quantil

C 1.2.4 Keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile

Die phytohygienische Unbedenklichkeit von Komposten, deren Maßstab die weitgehende Freiheit von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen darstellt, ist zu Recht eine wesentliche Voraussetzung für ihre nachhaltige landwirtschaftliche Verwertung. Die aktuelle Übersichtsuntersuchung zeigt (vgl. Tabelle 17), dass der Grenzwert lt. Bioabfall-Verordnung von 2 Keimpflanzen/l Prüfsubstrat im Mittel um Größenordnungen unterschritten wird. Selbst im 90. Quantil der Stichprobe wurde keine messbare Belastung festgestellt - ein Beleg für die Wirksamkeit der Heißrotte, durch die Unkrautsamen und austriebsfähige Pflanzenteile zuverlässig inaktiviert werden. Der sehr niedrige arithmetische Mittelwert von 0,09 Keimpflanzen/l FM und die Tatsache, dass selbst das 90. Quantil Null beträgt (vgl. Tabelle 17), weist auf wenige Ausreißer und Überschreitungen des Grenzwertes hin.

Bei den in den Versuchen eingesetzten Komposten (41 Proben) lag die Belastung mit Unkrautsamen mit im Mittel 0,5 - 0,6 Keimpflanzen/l FM etwas höher (Einzelergebnisse vgl. Anhang 1, Tabellen 1-02 bis 5-02). Das war in erster Linie auf den vereinzelt Einsatz von Frischkomposten zurückzuführen, die häufiger als Fertigkomposte geringe Anzahlen an keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen aufweisen können. Hier kam es auch in Einzelfällen mit Werten von 2 oder 3 Keimpflanzen/l FM zu geringen Grenzwertüberschreitungen.

Diese geringen Belastungen bildeten in den Versuchen eine wertvolle Voraussetzung, um das mögliche Auflaufen von Unkräutern und austriebsfähigen Pflanzenteilen zu beobachten und zu bewerten. Dazu wurde jährlich auf allen Versuchsparzellen der fünf Versuchsstandorte der Unkrautbesatz durch Bestimmung des Gesamt-Unkraut-Deckungsgrades (GUD) quantitativ bonitiert. Im Ergebnis von insgesamt 54 Bonituren (!) konnte in keinem Fall ein messbarer Unkrautbesatz der Flächen festgestellt werden, der auf die Kompostanwendung zurückzuführen gewesen wäre. Ergänzende Recherchen bei Landwirten, die Komposte regelmäßig einsetzen, haben diesen Befund bestätigt.

Damit ist die häufig geäußerte Befürchtung, dass mit der Kompostanwendung eine zunehmende Verunkrautung der Ackerflächen verbunden sein könnte, fachlich widerlegt und nicht zutreffend. Mögliche Einzelfälle lassen sich dadurch erklären, dass Komposte ohne eine ausreichende Heißrotte eingesetzt worden sind. Bei Einhaltung der Vorschriften der Bioabfall-Verordnung und insbesondere des RAL-Gütezeichens 251 sind solche Fälle praktisch ausgeschlossen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Freiheit der Komposte von keimfähigen Samen und austriebsfähigen Pflanzenteilen als wesentliche Voraussetzung für ihren landwirtschaftlichen Einsatz bei professionell gerotteten Komposten gewährleistet ist. Sie bilden damit für die landbauliche Verwertung kein Problem.

C 1.3 Mikrobiologische Parameter und Seuchenhygiene

Als obligatorische Voraussetzung für die landwirtschaftliche Anwendung von Komposten gilt die seuchenhygienische Unbedenklichkeit, die durch den Nachweis der Freiheit von Salmonellen zu belegen ist.

In den Jahren 1995 -1998 wurde der entsprechende Nachweis durch die Hersteller als ausreichend gewertet. Von 2001 - 2006 wurde eine zusätzliche Untersuchung auf Salmonellen durch die LUFA Augustenberg durchgeführt, die im Zeitraum 2001 - 2003 auf weitere Parameter ausgedehnt wurde, um eine Übersicht über die mikrobiologische Situation der Komposte zu gewinnen:

- | | |
|--|--|
| ▪ Aerobe Gesamtbakterienzahl: | Orientierungswert $\leq 5 \times 10^8/\text{g FM}$ ²⁶ |
| ▪ Fäkalkoliforme Bakterien (E. coli): | Orientierungswert $\leq 5 \times 10^3/\text{g FM}$ |
| ▪ Pilze (optional für Kompostprojekt): | übliche Werte $10^4 - 10^5/\text{g FM}$ ²⁷ |

Die vorliegenden Ergebnisse (vgl. Anhang 1, Tabellen 1-02 bis 5-02) erlauben folgende Einschätzung (vgl. auch ANONYM 2003A):

- Die Nachweise der Hersteller und die zusätzlichen Untersuchungen auf Salmonella, die durchweg nicht nachweisbar waren, unterstreichen die gesicherte seuchenhygienische Unbedenklichkeit der eingesetzten Komposte.
- Die Komposte verfügen durchweg über hohe Gesamtbakterienzahlen von 10^6 bis $10^8/\text{g FM}$. Sie sind Ausdruck für einen biologisch aktiven Kompost und damit positiv einzuschätzen.

²⁶ Orientierungswerte für die aerobe Gesamtbakterienzahl sowie E. coli lt. Hygienebaumusterprüfsystem der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.

²⁷ Orientierungswerte LUFA Augustenberg

- Die Gehalte der Komposte an koliformen Keimen bewegen sich überwiegend unterhalb des Orientierungswertes von 5×10^3 /g FM. Hohe Werte sind grundsätzlich hygienisch nicht bedenklich, da im Boden stets eine weitere Reduzierung erfolgt. Überschreitungen des Orientierungswertes geben jedoch Anlass zu prüfen, ob bei der Behandlung zur Hygienisierung Fehler aufgetreten sind.
- Die Pilzgehalte der Komposte bewegen sich zwischen 10^4 und 10^7 /g FM. Hohe Pilzgehalte sind typisch für einen Kompost, in dem schon große Anteile der organischen Substanz mineralisiert worden sind. Sie sind für die landbauliche Verwertung vorteilhaft, weil sie die biologische Aktivität des Bodens fördern.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die in den Versuchen eingesetzten Komposte über den gesamten Versuchszeitraum durchweg hygienisch unbedenklich waren (frei von Salmonellen) und eine gute mikrobiologische Aktivität aufwiesen. Diese für die landbauliche Verwertung unabdingbaren Voraussetzungen sind bei ordnungsgemäßer Heißrotte gewährleistet.

C 2 Kompostwirkungen in den Anwendungsversuchen

C 2.1 Zuführen

C 2.1.1 Wertgebende Inhaltsstoffe

C 2.1.1.1 Organische Substanz und basisch wirksame Substanz

Mit jährlichen Kompostgaben von 10 t/ha TM gemäß Stufe K2 wurden im Mittel aller Versuchstandorte erhebliche Mengen an **organischer Substanz** von jährlich 4,9 t/ha (Spannweite 3,6 - 6,5 t/ha TM) ausgebracht (vgl. Abbildung 10, Einzelergebnisse vgl. Anhang 1, Tabellen 1-03 bis 5-03). Der Anteil dieser Zufuhr an reproduzierbarem organischen Kohlenstoff für die Humusbildung im Boden entspricht im Mittel²⁸ etwa 1,3 - 1,7 t/ha. Mit diesem Beitrag wird - wie schon die Übersichtsuntersuchungen gezeigt haben (vgl. Punkt C 1.1.2.1 und Abbildung 5) - die Reproduktion der organischen Substanz des Bodens in der Regel mindestens gewährleistet bzw. der Humusgehalt sogar allmählich angehoben (vgl. Punkt C 2.2.1.2). Sehr hohe Kompostgaben, wie in der Stufe K 3 verabreicht, übersteigen damit den Bedarf des Bodens erheblich, sie sind nur für Sanierungen humusarmer Böden relevant.

Mit den Kompostgaben wurden nicht unerhebliche **Kalkgaben** (BWS) verabreicht, im Mittel der Standorte jährlich 5 dt/ha CaO (große Spannweite von 3,1 - 7,0 dt/ha CaO). Sie tragen maßgeblich zur Stabilisierung des pH-Wertes des Bodens bei und entsprechen etwa einer Erhaltungskalkung (vgl. Punkt C 2.2.1.1).

C 2.1.1.2 Nährstoffe

Die Nährstoffzufuhren mit jährlichen Kompostgaben von 10 t/ha TM (vgl. Abbildung 11, Einzelergebnisse vgl. Anhang 1, Tabellen 1-03 bis 5-03) bewegten sich im Mittel aller Versuche auf höherem Niveau als im Mittel der Übersichtsuntersuchungen für Komposte (vgl. Abbildung 7). Dabei kamen auf den Standorten mit Silomais(S.Mais)-Fruchtfolge (Stockach, Ellwangen, Heidenheim), bedingt durch die dort anfallenden nährstoffreichen Komposte, erheblich höhere Frachten an Stickstoff, Phosphor und Kalium auf den Boden als auf den Standorten mit Körnermais(K.Mais)-Fruchtfolge (Forchheim, Weierbach).

Gemäß Dünge-Verordnung ist für einen nachhaltigen Komposteinsatz in der Pflanzenproduktion eine mittel- und langfristig möglichst ausgeglichene Nährstoffbilanz maßgebend. Die Versuche bieten dazu ein deutlich differenziertes Bild (vgl. Abbildung 12):

Niedrige Kompostgaben von jährlich 5 t/ha TM (Stufe K 1) könnten den Nährstoffbedarf per Saldo nur bei Magnesium decken. Bei allen übrigen Nährstoffen besteht stets ein Negativsaldo, ausgeprägt bei der entzugsstarken S.Mais-Fruchtfolge.

²⁸ bezogen auf einen mittleren Anteil von 51 % in der organischen Kompostsubstanz, vgl. BGK (2005)

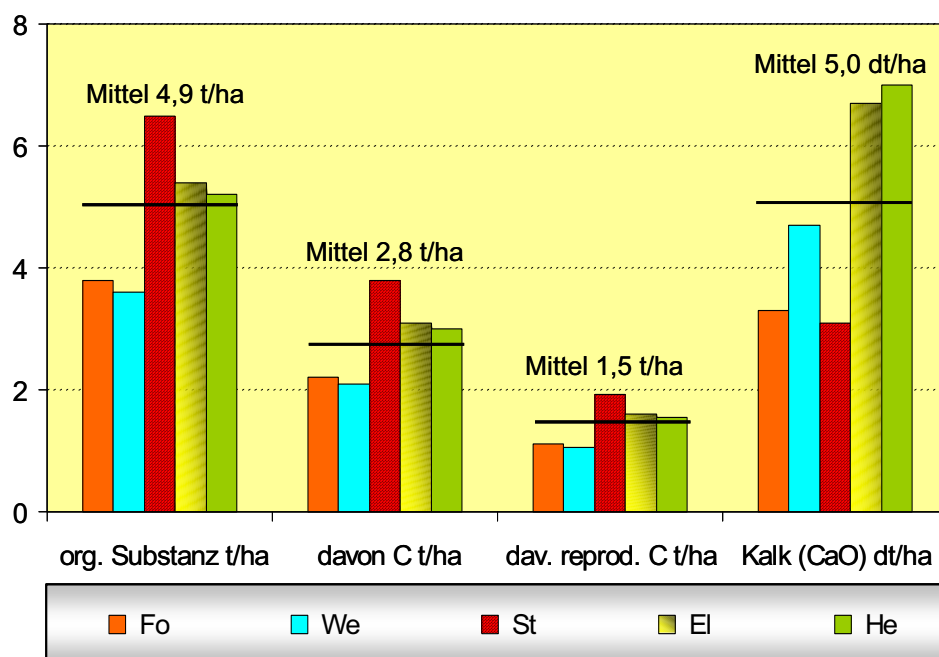


Abbildung 10 Jährliche Zufuhren an organischer Substanz sowie an Kalk (BWS) in der Kompoststufe K2 (= 10 t/ha TM)

Einzelwerte sowie Mittel der Versuchsstandorte²⁹: Orte Fo, We, Pf, St - Mittel von 12 Jahren, El und He - Mittel von 9 Jahren.

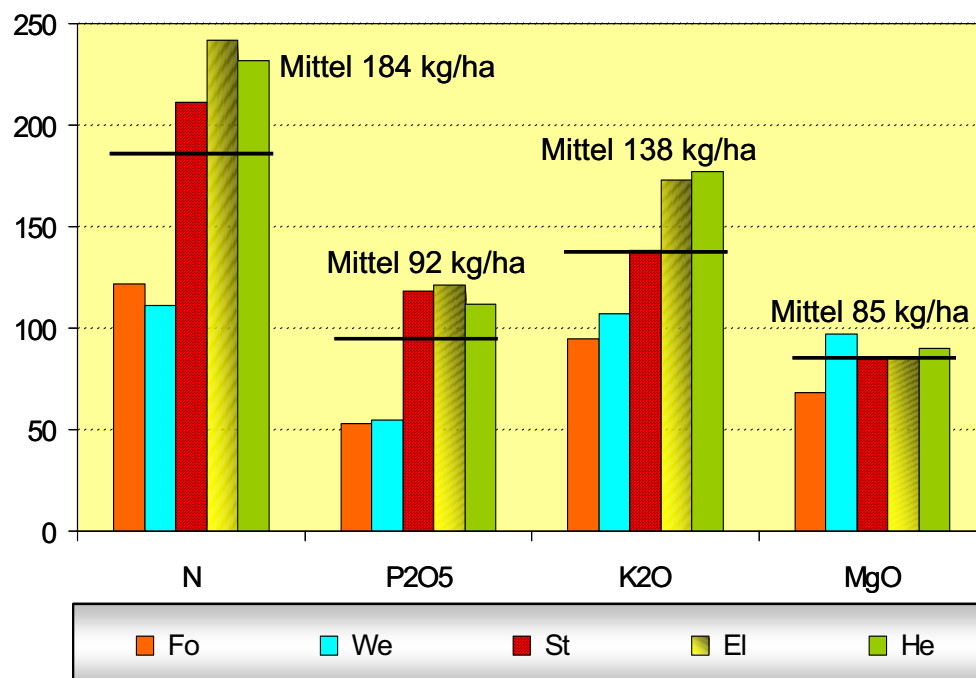


Abbildung 11 Jährliche Nährstoffzufuhren in kg/ha der Kompoststufe K2 (= 10 t/ha TM)

Einzelwerte sowie Mittel der Versuchsstandorte (Legende vgl. Abbildung 10)

²⁹ Fo - Forchheim, We - Weierbach, St - Stockach, El - Ellwangen, He - Heidenheim, vgl. Tabelle 11

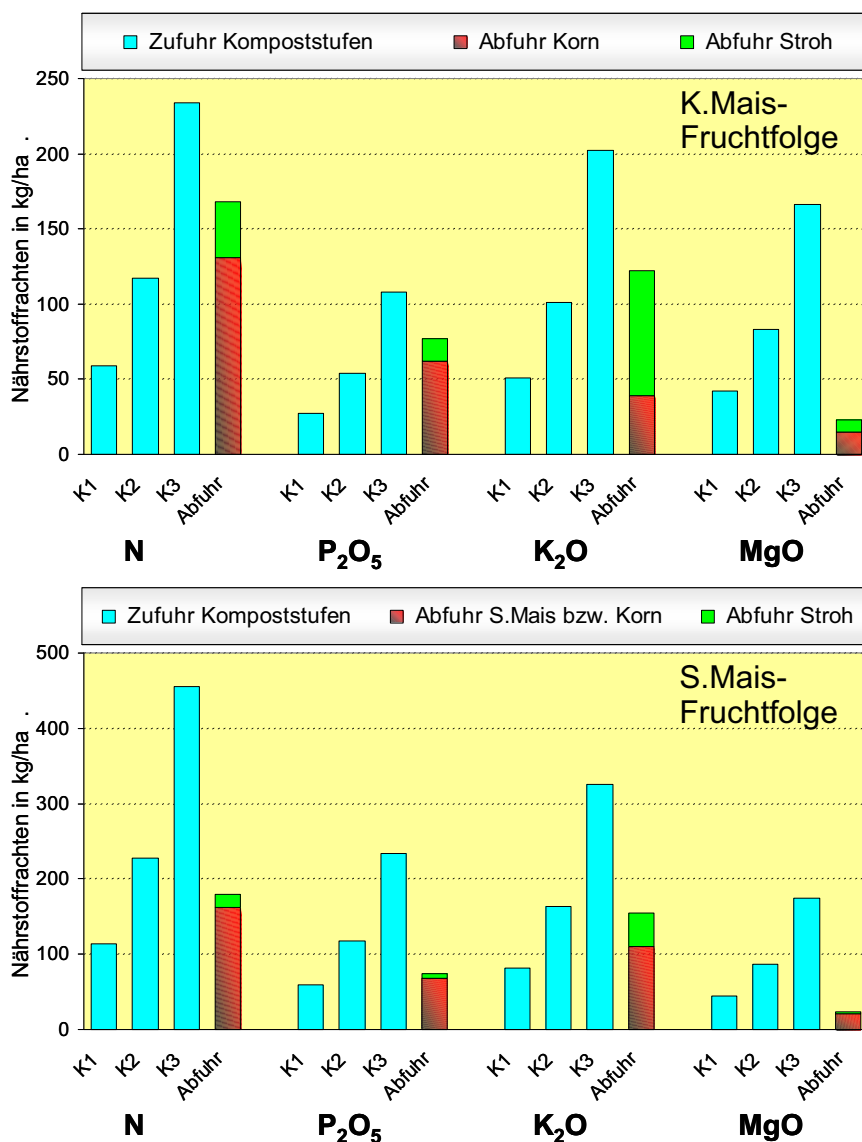


Abbildung 12 Saldo Nährstoffzufuhr mit gestaffelten Kompostgaben (K1, K2, K3)/ Nährstoffabfuhr Haupternteprodukte (Korn, S.Mais) und Stroh:

Jährliche Nährstofffrachten in kg/ha

Oben: K.Mais-Fruchtfolge (K.Mais/W.Weizen/W.Gerste), Mittel Orte Fo und We

Unten: S.Mais-Fruchtfolge (S.Mais/W.Weizen/W.Gerste), Mittel Orte St, El und He

Unter Berücksichtigung der großen Spannweiten der Versuche fallen die Nährstoffsalden der K.Mais-Fruchtfolge bei jährlichen Gaben von 10 t/ha TM (Stufe K2) - mit Ausnahme des deutlichen Positivsaldos von Magnesium - im Mittel etwa ausgeglichen, bei zusätzlicher Abfuhr von Stroh sogar schwach negativ aus. Bei den höheren Zufuhren der S.Mais-Fruchtfolge liegen dagegen durchweg leichte Positivsalden vor. Hohe Kompostgaben gemäß Stufe K 3 führen stets zu deutlichen Positivsalden, besonders ausgeprägt bei Magnesium.

Zusammenfassend belegt schon die Nährstoffsaldierung anschaulich (zur Wirkung der Nährstofffrachten auf die Bodenversorgung vgl. Punkt C 2.2.1), dass optimale Kompostgaben von jährlich 7 - 10 t/ha TM (entsprechend 20 - 30 t/ha TM in 3jährigen Turnus) im Interesse ausge-

gleichener Salden nicht überschritten werden sollten. Der stets positive Magnesiumsaldo bildet kein Problem, weil er der permanenten Magnesiumauswaschung aus dem Boden entgegenwirkt. Sehr hohe Kompostgaben, bei denen positive Nährstoffsalden unvermeidlich sind, sollten nur unter besonderen Umständen (z.B. Sanierung humus- und nährstoffarmer Böden) eingesetzt werden.

C 2.1.2 Schwermetalle und organische Schadstoffe

Eine objektive Risikobewertung liefern die **realen Schwermetallfrachten**, die dem Boden mit den Kompostgaben zugeführt werden. Ausgehend von dieser, inzwischen fachlich allgemein akzeptierten Konzeption (VDLUFA 2002) wurden die Schwermetallfrachten, die in den Versuchen mit Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM entspr. 30 t/ha TM in 3jährigen Turnus (Stufe K 2) in den Boden eingebracht wurden, als Relativwerte der dafür zulässigen Grenzfrachten lt. Bioabfall-Verordnung berechnet (Einzelwerte vgl. Anhang 1, Tabellen 1-03 bis 5-03). Die Ausschöpfung der Grenzfrachten (= 100 %) ergibt folgendes Bild (vgl. Abbildung 13):

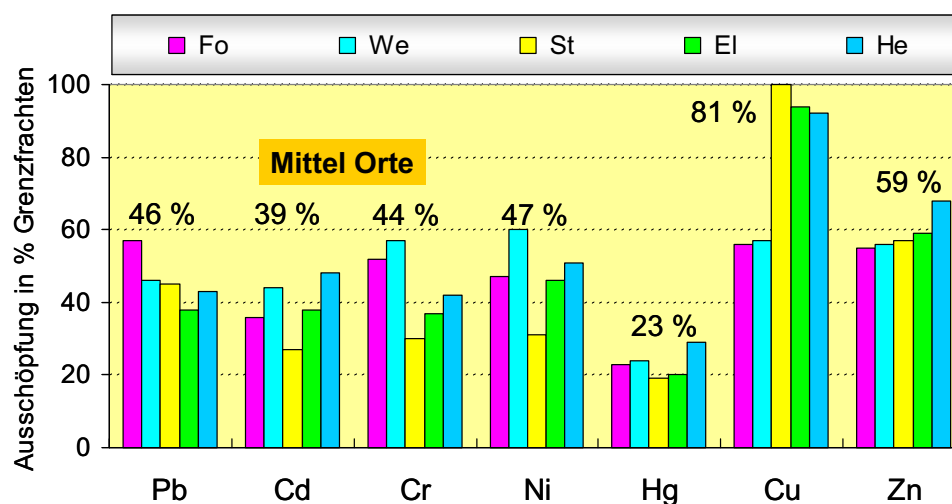


Abbildung 13 Schwermetallfrachten der in den Versuchen eingesetzten Komposte relativ:
 Ausschöpfung der stringenteren Grenzfrachten lt. Bioabfall-Verordnung
 (= 100 %) für Gaben von 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus
 Mittlere Schwermetallfrachten bei Kompoststufe K2:
 jährlich 10 t/ha TM entspr. 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus
 Säulen: Einzelwerte Versuchstandorte (Legende Orte vgl. Abbildung 10)
 Mittel Orte: Prozentangaben über Säulen

Im Mittel aller Versuchsjahre bewegen sich die Ausschöpfungsraten bei den unerwünschten Schwermetallen Pb, Cd, Cr, Ni um 40 - 45 % der zulässigen Grenzfrachten, bei Hg sogar unter 25 %. Eine deutlich höhere Ausschöpfung ist bei Cu und Zn festzustellen. Die mittleren Raten bewegen sich bei Cu um 80 % mit Höchstwerten bis in den Bereich der Grenzfracht hinein, bei Zn um 60 %.

Zusammenfassend belegen die Versuche praktische Erfahrungen, dass die Einhaltung der Schwermetall-Grenzfrachten mit optimalen Kompostgaben bis maximal 30 t/ha TM im 3jährigen

Turnus in der Regel zuverlässig gewährleistet werden kann. Das trifft durchweg für die unerwünschten Schwermetalle Pb, Cd, Cr, Ni und Hg zu, die die Grenzfrachten deutlich unterschreiten. Bei Zn und vor allem bei Cu sind höhere Ausschöpfungsraten bis zum Erreichen des Grenzwertes möglich. Auf Grund ihrer Sonderrolle als gleichzeitig essenzielle Spurennährstoffe sind sie jedoch tolerierbar, solange geogene Hintergrundwerte bzw. Bodengrenzwerte lt. Bioabfall-Verordnung unterschritten werden. Überhöhte Kompostgaben, wie in der Kompoststufe K3 = jährlich 20 t/ha TM, führen gehäuft zu Grenzwertüberschreitungen, in der Regel durch die begrenzenden Schwermetalle Cu und Zn. Sie sind deshalb aus Gründen des Bodenschutzes nur in Ausnahmefällen³⁰ akzeptabel.

Organische Schadstoffe

Eine ausführliche Bewertung der Gehalte an PCB und PCDD/F der in den Versuchen eingesetzten Komposte erfolgte schon unter Punkt C 1.2.2 (Einzelwerte vgl. Anhang 1, Tabellen 1-03 bis 5-03). Die Gehalte bewegten sich überwiegend im sehr niedrigen Gehaltsbereich, nur wenig oberhalb der ubiquitären Bodenbelastung. Sie bilden nach aktueller Kenntnis für die Kompostanwendung kein Problem. Eine Frachtenbetrachtung wurde auf Grund der niedrigen Gehalte und der damit verbundenen hohen Streuung als nicht sinnvoll angesehen und daher nicht durchgeführt (Ergebnisse zur Bodenuntersuchung vgl. Punkt C 2.2.1.8).

C 2.2 Wirkungen auf den Boden

C 2.2.1 Bodenchemische Wirkungen

Für die Beurteilung der nachfolgenden Bodenparameter wurden Untersuchungsergebnisse der Kompost-Anwendungsversuche aus den Jahren 1995 - 2006 (Orte Forchheim, Weierbach und Stockach) sowie 1998 - 2006 (Orte Ellwangen und Heidenheim) herangezogen.

Da die Analysen-Ergebnisse der Bodenproben in den einzelnen Jahren aus verschiedenen Gründen (Schwankungen durch die Probenahme, inhomogene Kompostverteilung in der Ackerkrume, jahreszeitlich schwankende Bodenbedingungen u.a.) bestimmten, objektiv bedingten Streuungen unterliegen, wurden zur Ableitung belastbarer allgemeiner Trends in der Regel Mittelwerte von Fruchtfolge-Rotationen (3 Jahre) gebildet. Die nachfolgenden Ergebnisdarstellungen und -beurteilungen beziehen sich, sofern nicht anderweitig ausgewiesen, stets auf diese Mittelwerte.

C 2.2.1.1 pH-Wert

Der pH-Wert des Bodens wurde durch regelmäßige Kompostgaben im Versuchsverlauf allmählich angehoben (Einzelergebnisse vgl. Anh. 1., Tabellen 1-05 - 6-05, Blatt pH). Im Mittel aller Versuchsstandorte (ohne Standort Weierbach³¹) stieg der pH-Wert nach 12jähriger Laufzeit (Versuche Forchheim und Stockach) bzw. 9jähriger Laufzeit (Versuche Ellwangen und Heidenheim), ausgehend von einem Basis-pH ohne Kompost zu Versuchsbeginn von etwa 6,0 - 6,1,

³⁰ z.B. bei hohem Bedarf an Biomasse und Nährstoffen zur Sanierung von Böden. In solchen Fällen Auswahl von Komposten mit besonders niedriger Schwermetallbelastung.

³¹ Der Standort Weierbach weist auf Grund des hohen Kalkanteils des Bodens einen Basis-pH von 7,4 auf. Eine weitere pH-Anhebung war unter diesen schwach alkalischen Bedingungen durch die relativ geringe Kalkzufuhr mit den Kompostgaben (4,7 dt/ha CaO mit 10 t/ha TM Kompost) nicht möglich.

mit jeder Kompoststufe um etwa 0,2 - 0,3 pH-Einheiten an (vgl. Abbildung 14). Schon niedrige Kompostgaben von jährlich 5 t/ha TM reichten aus, um den pH-Wert zumindest zu erhalten und sogar noch um etwa 0,2 pH-Einheiten leicht anzuheben. Ohne Kompostanwendung sanken die pH-Werte im Vergleich zum Versuchsbeginn, bedingt durch die Kalkzehrung im Versuchszeitraum, im Mittel um 0,1 - 0,2 Einheiten ab. Pflanzenbaulich maximal zulässige Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM bewirkten in den Versuchen bei einer mittleren Kalkzufuhr von jährlich 4 - 6 dt/ha CaO gesicherte pH-Anhebungen von 0,3 - 0,6 pH-Einheiten. Damit wurde durchweg die für mittlere und schwere Böden optimale Bodenreaktion erreicht. Besonders hoch fielen die pH-Steigerungen bei der Höchstgabe von jährlich 20 t/ha TM aus.

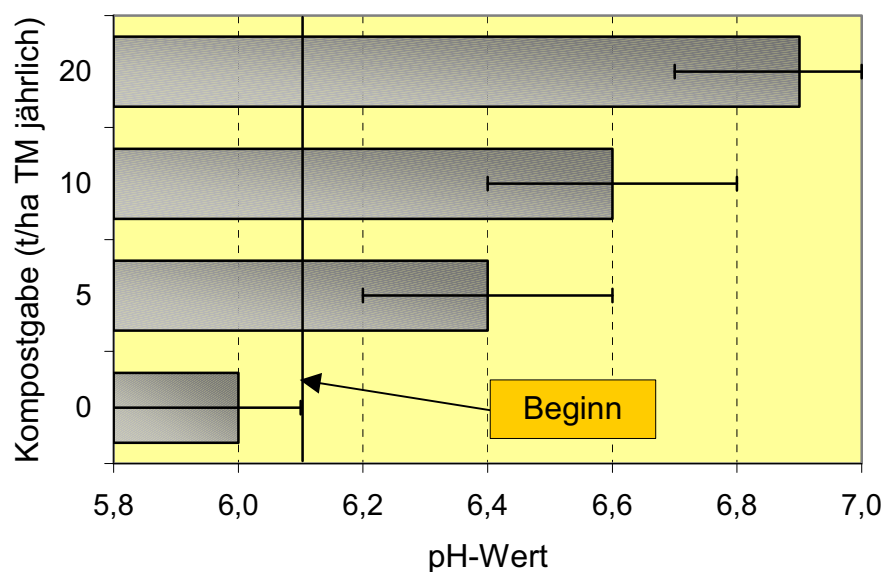


Abbildung 14 Entwicklung des pH-Wertes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe:
 Mittel aller Versuchsorte (ohne Weierbach) nach 9 bzw. 12 Versuchsjahren
 Balken - Mittelwerte Kompoststufen (Varianten 3, 6, 9 und 12), Jahre 2004 - 2006
 Spannweiten - 25. bzw. 75. Quantil der Einzelwerte
 Beginn - pH-Wert zu Versuchsbeginn
 (Orte Fo und St 1995 bzw. Orte El und He1998)

Das wird anschaulich durch die relativ enge Beziehung zwischen dem pH-Anstieg des Bodens und der Kalkzufuhr über die gesamte Versuchsdauer bestätigt (vgl. Abbildung 15). Danach erbrachten Kalkgaben von insgesamt 25, 50 bzw. 100 dt/ha CaO der Kompoststufen K1, K2 bzw. K3 im Mittel jeweils pH-Anhebungen von 0,2, 0,4 bzw. 0,6 pH-Einheiten (vgl. Regressionsgleichung der Trendlinie).

Zusammenfassend erhärten die Versuchsergebnisse die schon bei der Kalkbilanzierung getroffene Einschätzung (vgl. Punkte C 1.1.2.1 und C 2.1.1.1), dass sich die Kalkzufuhr mit Kompostgaben von 20 bis maximal 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus in der Größenordnung einer **wirksamen Erhaltungskalkung** bewegt, mit der der pH-Wert des Bodens zumindest stabilisiert, häufig sogar allmählich bis in den optimalen Bereich angehoben wird (**Einsparpotenzial**).

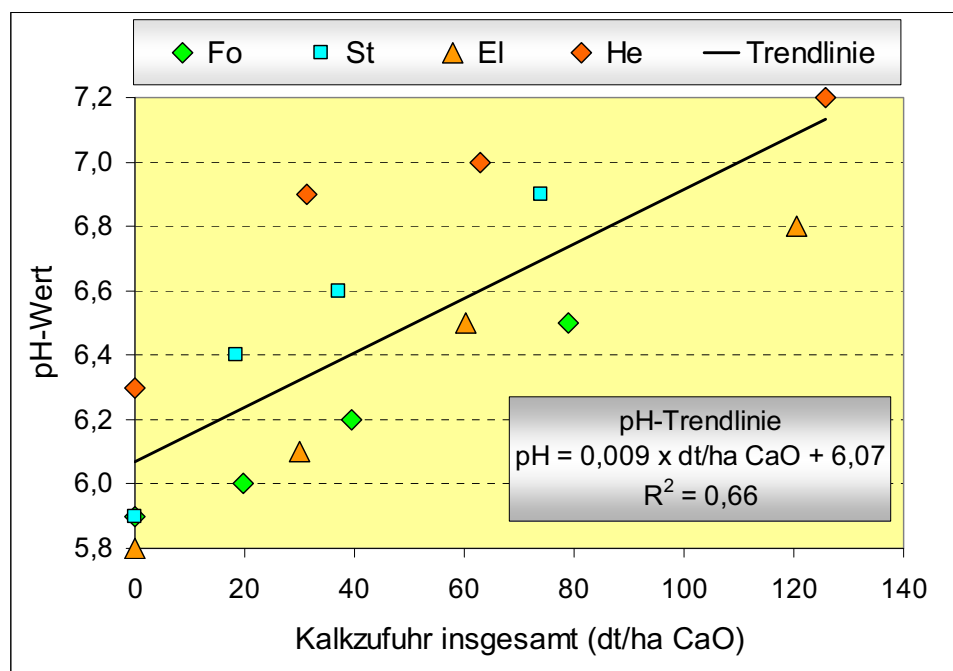


Abbildung 15 Beziehung zwischen Kalkzufuhr der Kompoststufen (jährlich 0, 5, 10 und 20 t/ha TM) im gesamten Versuchsverlauf und pH-Wert des Bodens
 Mittelwerte Orte Fo, St und We (Zufuhr Kalk: Summe von 12 Jahren) sowie El und He (Zufuhr Kalk: Summe von 9 Jahren)

Eine Kalkzehrung infolge regelmäßiger Kompostanwendung, die zu einem allmählichen Rückgang des pH-Wertes führen könnte, wie häufig geäußerte Vermutungen postulieren, ist nach diesen langjährigen Versuchsergebnissen ausgeschlossen. Die erhebliche Kalkzufuhr bei überhöhten Kompostgaben von 60 t/ha TM kann, wie die deutliche pH-Wirkung der Versuche zeigt, bei Sanierungsmaßnahmen für versauerte und degradierte Böden (z.B. Kippenböden) von Interesse sein.

C 2.2.1.2 Humusgehalt und Humusreproduktion

Die folgenden Auswertungen und Beurteilungen beruhen auf den ermittelten **Humusgehalten** des Bodens in Abhängigkeit von der Kompostgabe (vgl. Anhang 1, Tabellen 1-05 bis 6-05, Blatt Humus) sowie umfassenden statistischen Bewertungen zur **Humusreproduktion** (vgl. Anhang 2, Teil 1).

Ein Vergleich der in den Versuchen ermittelten Humusgehalte mit relevanten Bewertungsvorgaben nach WESSOLEK et al (2004) ergab (vgl. auch Anhang 2, Teil 1):

Alle Versuchsstandorte (außer Stockach) wiesen in den rein mineralisch gedüngten Kontrollvarianten 1 – 3 der Kompostanwendungsversuche Humusgehalte auf, die unter den standorttypischen Empfehlungen lagen. Die Kompostgaben führten nur in Stockach in der höchsten Aufwandmenge (jährlich 20 t/ha TM) zu Humusgehalten, die oberhalb der standorttypischen Humusgehalte lagen. Ansonsten hat die gestaffelte Kompostanwendung nicht zu einer überhöhten Humusversorgung geführt, obwohl ein Mehrfaches

an Humusreproduktionsleistung erfolgte, als im VDLUFA-Standpunkt „Humusbilanzierung“ empfohlen worden ist (KÖRSCHENS et al. 2004). Die Versuchsergebnisse repräsentieren damit keinen Einzelfall, sondern sind auf ähnliche ackerbauliche Verhältnisse übertragbar.

Der Gehalt des Bodens an organischer Substanz, synonym als *Humusgehalt*³² bezeichnet, wurde in allen Versuchen durch regelmäßige Kompostgaben stets positiv beeinflusst (vgl. Abbildung 16 sowie Anhang 1, Tabellen 1-05 bis 6-05, Blatt Humus). Die Rate der Zunahme der Humusgehalte betrug zum Abschluss der Versuche im Mittel aller Standorte etwa 0,30 % je 5 t/ha TM jährlich verabreichtem Kompost im Vergleich zur Kontrollvariante ohne Kompost. Bei den Versuchen mit S.Mais-Fruchtfolge (Orte Stockach, Ellwangen und Heidenheim) war eine höhere Anhebungsrate von etwa 0,42 % je 5 t/ha TM zu verzeichnen.

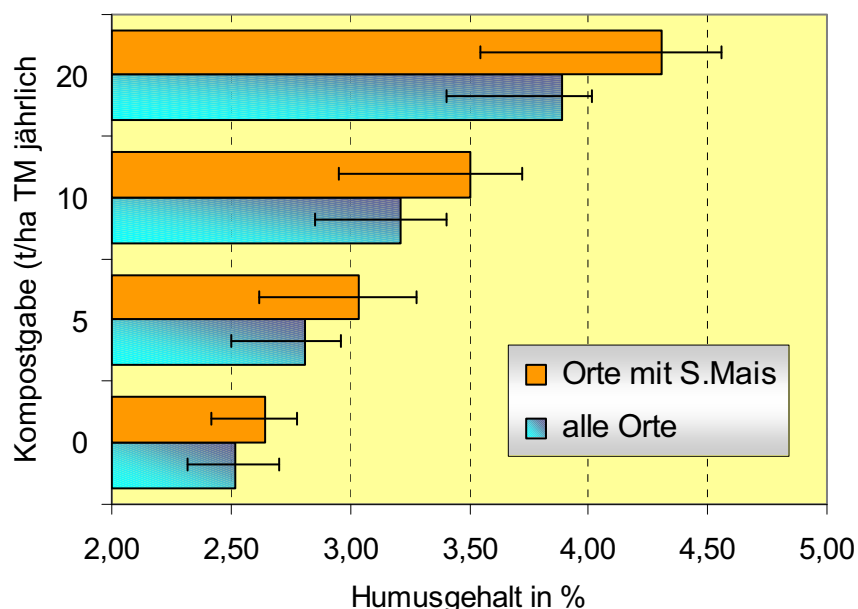


Abbildung 16 Entwicklung des Humusgehaltes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte nach 9 bzw. 12 Versuchsjahren

Balken - Mittelwerte Kompoststufen (Varianten 3, 6, 9 und 12), Jahre 2004 - 2006
 alle Orte - Fo, We, St, El und He Orte mit S. Mais - St, El, He
 Spannweiten - 25. bzw. 75. Quantil der Einzelwerte

Die umfassende Auswertung der drei 12jährigen Versuche Forchheim, Weierbach und Stockach zeigte ergänzend (vgl. Anhang 2, Teil 1), dass zwischen steigenden Kompostgaben und den Humusgehalten lineare, bei hohen Gaben statistisch gesicherte Beziehungen bestehen. Die drei Stickstoff-Düngungsstufen hatten dabei nur geringe Wirkungen auf die Entwicklung der Humusgehalte. Für die Ableitung der Humusreproduktionsleistung der geprüften Komposte

³² Mit der Elementaranalyse wird der C-Gehalt des Bodens erfasst, der - ausgehend von einem mittleren C-Gehalt des Humusanteiles - mit dem Faktor 1,72 multipliziert als „Humus“ angegeben wird. Unmittelbar nach der Kompostapplikation besteht jedoch der größere Teil des ermittelten C-Anteiles aus organischer Substanz aus Kompost. Erst nach mehrjähriger Umsetzung bilden sich daraus die bodentypischen Huminstoffe.

kann von linearen Zuwächsen ausgegangen werden, wobei die Stickstoffgabe vernachlässigbar ist.

Wie die großen Spannweiten der Mittelwerte in Abbildung 16 und auch die weite Streuung der Zunahme der Humusgehalte in Abbildung 17 zeigen, bestanden zwischen den einzelnen Versuchsstandorten deutliche Unterschiede. Relativ geringe Anhebungen waren auf dem leichten Standort Forchheim zu verzeichnen, offenkundig bedingt durch die hohe mikrobiologische Aktivität und hohe Mineralisierungsleistung des sehr leichten Bodens bei hohen Durchschnittstemperaturen in der Rheinebene. Das trifft auch auf den Versuch Weierbach mit schwerem Boden zu. Auf dem Versuch Stockach bewegten sich die Anstiege der Humusgehalte, trotz der im Vergleich höchsten Zufuhr an organischer Substanz, nur im mittleren Bereich, hier gleichfalls eine Folge der hohen mikrobiologischen Aktivität des Bodens in Verbindung mit hohen Durchschnittstemperaturen, durch die die eingesetzten Frischkomposte beschleunigt abgebaut wurden. Dagegen waren auf den Standorten Ellwangen und Heidenheim deutlich höhere Anhebungsraten festzustellen, sicher bedingt durch einen verlangsamten Abbau der zugeführten organischen Substanz als Folge der schweren Böden und der niedrigeren Durchschnittstemperaturen auf der Ostalb.

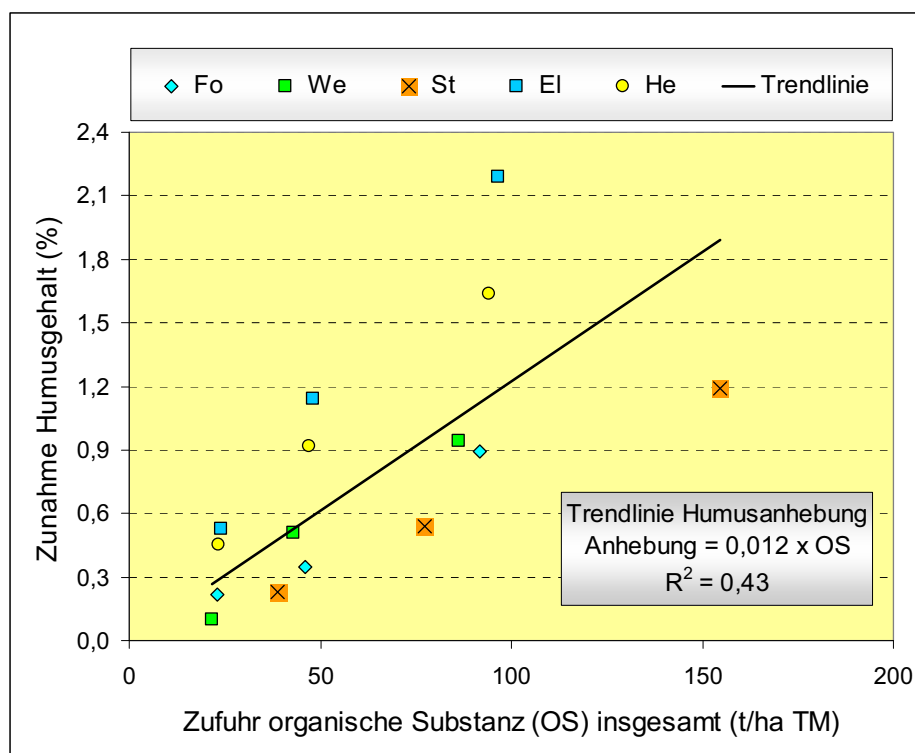


Abbildung 17 Beziehung zwischen der Zufuhr an organischer Substanz der Kompoststufen (jährlich 0, 5, 10 und 20 t/ha TM) im gesamten Versuchsverlauf und der Zunahme des Humusgehaltes des Bodens

Mittelwerte Orte Fo, St und We (Zufuhr OS: Summe von 12 Jahren) sowie El und He (Zufuhr OS: Summe von 9 Jahren)

Im Mittel aller Versuche wurde mit einer Zufuhr an organischer Kompostsubstanz von etwa 8 - 9 t/ha TM über den gesamten Versuchszeitraum eine Anhebung des Humusgehaltes von 0,1 %

erreicht (vgl. Trendlinie in Abbildung 17). Das bedeutet, dass die Humusbilanz des Bodens schon mit relativ niedrigen Kompostgaben - in den Versuchen wurden mit jährlichen Kompostgaben von nur 5 t/ha TM Mengen an organischer Substanz von insgesamt etwa 25 t/ha TM (Spannweite 20 - 35 t/ha TM) ausgebracht - positiv beeinflusst werden kann.

Pflanzenbaulich zulässige Kompostgaben bis zu maximal 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus sind damit auf jeden Fall geeignet, die Humusgehalte von Ackerböden zu optimieren. Die analogen Einschätzungen, die anhand der Positivsalden der Humusbilanz von Böden beim Komposteinsatz getroffen wurden (vgl. Punkte C 1.1.2.1 und C 2.1.1.1), werden damit durch die langjährigen Versuchsergebnisse klar bestätigt.

In den drei 12jährigen Versuchen Forchheim, Weierbach und Stockach ergaben sich zur Humusreproduktionsleistung der eingesetzten Komposte folgende interessante Details (vgl. Anhang 2, Teil 1):

Die statistisch gesicherten Anhebungen der Humusgehalte folgten in Abhängigkeit vom eingesetzten Kompost, bezogen auf die zugeführte Menge an organischer Substanz, der Reihenfolge

Grüngutfertigkompost > Biotonnenabfallfertigkompost > Biotonnenabfallfrischkompost

Eine Hochrechnung der Humusgehalte auf die Zunahme der Mengen an organischer Substanz im Boden (0 – 30 cm) ergab folgende Wiederfindungsraten der zugeführten organischen Kompostsubstanz:

- Grüngut-Fertigkompost (Standort Weierbach, schluffiger Lehm) 50,6 %
- Biotonnen-Fertigkompost (Standort Forchheim, lehmiger Sand) 45,7 %
- Biotonnen-Frischkompost (Standort Stockach, schluffig-toniger Lehm) 29,7 %

Die Humusanreicherung betrug bei der nach Bioabfall-Verordnung maximal zulässigen Kompostgabe von jährlich 10 t TM/ha:

- Grüngut-Fertigkompost (Standort Weierbach) 0,82 t C_{org}/ha*a
- Biotonnen-Fertigkompost (Standort Forchheim) 0,97 t C_{org}/ha*a
- Biotonnen-Frischkompost (Standort Stockach) 1,13 t C_{org}/ha*a

Die Einstellung eines fließgleichgewichtig stabilen Humusgehaltes wurde in den 12 Versuchsjahren durch die geprüften Kompostgaben nicht erreicht. Bis zum Versuchsabschluss blieb der lineare Anstieg der Humusmengen im Boden ungebrochen. Damit gehen die erzielten Ergebnisse deutlich über die Angaben aus dem VDLUFA-Standpunkt „Humusbilanzierung“ (KÖRSCHENS et al. 2004) hinaus, der für Komposte einerseits eine hohe Humusreproduktionsleistung von etwa 40 bis 50 % der dem Boden zugeführten organischen Substanz angibt. Andererseits wird hier jedoch davon ausgegangen, dass auch diese organische Substanz nach Einstellung eines standort- und nutzungstypischen Humusgehaltes innerhalb einer Bilanzperiode (in der Regel eine Fruchtfolgerotation) abgebaut ist, wobei für die Humusbilanzierung deutlich geringere Kompostgaben zugrunde gelegt werden als in dem vorgestellten Kompostprojekt geprüft worden sind.

Aus deutschen Dauerdüngungsfeldversuchen kann ein mittlerer Humus-C-Bedarf von etwa 0,4 t/ha*a abgeleitet werden, wenn keine Rückführung von Ackerrückständen als organische Primärschubstanz erfolgt. Die nach VDLUFA-Standpunkt „Humusbilanzierung“ für die drei geprüf-

ten Komposte ableitbaren Aufwandmengen zur einfachen Humusreproduktion³³ ergeben sich dann wie folgt:

- | | |
|--|----------------|
| ▪ Grüngut-Fertigkompost (Standort Weierbach) | 4,8 t TM/ha*a |
| ▪ Biotonnen-Fertigkompost (Standort Forchheim) | 3,8 t TM /ha*a |
| ▪ Biotonnen-Frischkompost (Standort Stockach) | 2,6 t TM /ha*a |

Abfallrechtlich zulässige und pflanzenbaulich mögliche Kompostgaben von bis zu 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus bewegen sich deutlich über den notwendigen Kompostgaben für die einfache Humusreproduktion. Sie sind damit auf jeden Fall geeignet, die Humusgehalte von an Humus verarmten Ackerböden zu optimieren. Die analogen Einschätzungen, die anhand der Positivsalden der Humusbilanz von Böden beim Komposteinsatz getroffen wurden (vgl. Punkte C 1.1.2.1 und C 2.1.1.1), werden durch die langjährigen Versuchsergebnisse klar bestätigt.

Für leichter abbaubare organische Dünger (z.B. Gründüngung, Stroh, Gülle) wird davon ausgegangen, dass eine über die Empfehlungen der Humusbilanzierung hinausgehende Humusversorgung zu erhöhtem Abbau von organischem Kohlenstoff im Boden führt. Das ist in diesem Kompostprojekt nicht bestätigt worden, so dass sich für die Kompostanwendung **erste Hinweise auf eine nachhaltige Humusanreicherung im Boden** ergeben.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass regelmäßige und pflanzenbaulich geeignete Kompostgaben von 20 - 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus gut geeignet sind, die Humusbilanz des Bodens positiv zu gestalten, seine Humusgehalte zu optimieren und damit vor allem die physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften zu verbessern (vgl. Punkt C 2.2.2). Mit den beträchtlichen Zufuhren an organischer Substanz von im Mittel 10 - 20 t/ha TM (vgl. Punkt C 1.1.2.1) und ihrem relativ hohen Humus-reproduzierbarem Anteil von etwa 50 % (BGK 2005) kann die Reproduktion der organischen Substanz im Boden auf jeden Fall gewährleistet werden (**Einsparpotenzial**). Die mittleren Anhebungsraten von etwa 0,1 % Humusanstieg je 8 - 9 t/ha TM an organischer Substanz, die aus den Versuchen abgeleitet wurden, sind dabei nur als Anhaltspunkt anzuwenden³⁴. Insgesamt gewinnt die Kompostanwendung, angesichts der langjährigen Versuchsergebnisse, vor allem in Marktfruchtbetrieben mit ihrer meist negativen Humusbilanz und insbesondere bei der Rekultivierung stark humusverarmter Böden zunehmend an Bedeutung.

C 2.2.1.3 N-Gesamtgehalt

Die regelmäßige N-Zufuhr mit den gestaffelten Kompostgaben - bei jährlich 10 t/ha TM (Stufe K2) durchschnittlich 180 - 190 kg/ha (vgl. Abbildung 11) - hat im Versuchszeitraum im Mittel aller Versuche, im Vergleich zum Berichtsjahr 2003 (ANONYM 2003A), zu weiteren leichten An-

³³ „Status quo“, d.h. Erhaltung des Humusgehaltes im Boden.

³⁴ Die o.g., aus den Versuchen abgeleiteten Kennziffern für mittlere Anhebungsraten des Humusgehaltes beschreiben einen Gleichgewichtszustand, wie er sich im Boden als Ergebnis intensiver Bewirtschaftung, d.h. Abfuhr aller Ernteprodukte, im Wechselspiel zwischen Zufuhr an organischer Substanz (Kompost, Wurzelreste) und Humuszehrung durch die angebauten Fruchtarten allmählich einstellt. Unter den Bedingungen regulärer Pflanzenproduktion, unter denen Nebenernteprodukte, wie Stroh, zur Nutzung der Nährstoffe und der organischen Substanz in den Boden zurückgeführt werden, sind ähnliche Anhebungen der Humusgehalte schon mit geringeren Zufuhren an organischer Substanz aus Kompostgaben zu erwarten.

hebungen der N-Gesamtgehalte geführt (vgl. Abbildung 18 und Anhang 1, Tabellen 1-05 bis 6-05, Blatt N-Gesamt). Im Mittel aller Standorte wurde der N-Gesamtgehalt im Boden durch die jährlichen Kompostgaben von 5, 10 bzw. 20 t/ha TM im Vergleich zur Kontrollvariante ohne Kompost um etwa 0,02, 0,04 bzw. 0,07 % angehoben. Bei den drei Versuchen mit S.Mais-Fruchtfolge fiel der Anstieg im Mittel mit 0,03, 0,05 bzw. 0,10 % noch höher aus. Je 5 t/ha TM des jährlich verabreichten Kompostes war damit eine Anhebung des N-Gesamtgehaltes im Versuchszeitraum von 9 bzw. 12 Jahren von etwa 0,02 % verbunden. Die weitgehend lineare Beziehung zwischen den gestaffelten Kompostgaben und den N-Gesamtgehalten am Versuchsende war dabei überwiegend statistisch gesichert (vgl. Anhang 2, Teil 1).

Auf allen Versuchsstandorten besteht eine Beziehung zwischen N-Gesamtgehalt und der N-Menge, die im Versuchszeitraum mit den gestaffelten Kompostgaben insgesamt zugeführt worden ist (vgl. Abbildung 19). Im Mittel aller Versuche (siehe Trendliniengleichung) wurde mit einer N-Zufuhr von insgesamt 500 kg/ha N eine Anhebung des N-Gesamtgehaltes um 0,01 % erreicht. Das ist - ausgehend davon, dass eine Zunahme des N-Gesamtgehaltes im Ackerboden von 0,01 % rechnerisch im Mittel einer N-Menge von etwa 350 kg/ha entspricht³⁵ - als eine für Praxisverhältnisse recht gute Übereinstimmung³⁶ zu bewerten.

Ähnlich wie beim Humusgehalt waren zwischen den einzelnen Standorten Unterschiede zu verzeichnen, die vorrangig durch die differenzierte N-Zufuhr mit den Kompostgaben im Versuchszeitraum zu erklären sind:

Während auf Standorten mit 12jähriger Laufzeit, wie Forchheim und Weiherbach, relativ geringe Anstiege des N-Gesamtgehaltes zu beobachten waren (auf dem sandigen Boden Forchheim bedingt durch die hohe Bodenaktivität und entsprechend höhere N-Umsetzung sowie durch Auswaschung), bewirkten die hohen jährlichen N-Zufuhren mit Kompost auf den Standorten Ellwangen und Heidenheim trotz kürzerer Versuchsdauer die höchsten Anhebungen. Die höchste N-Zufuhr von etwa 3.300 kg/ha auf dem Versuch Stockach zeitigte nur ähnliche Anstiege wie bei Ellwangen und Heidenheim auf niedrigerem Niveau der N-Zufuhr. Ursache dürfte auch hier der hohe N-Umsatz und der längere Versuchszeitraum sein³⁷.

Zusammenfassend zeigten die Kompost-Anwendungsversuche anschaulich, dass regelmäßige Kompostgaben zu messbaren Anhebungen des N-Gesamtgehaltes im Boden führen und damit neben der Humusbilanz auch den N-Gesamtpool (in Abhängigkeit von der Bodenart etwa 3.000 - 6.000 kg/ha N) mittelfristig positiv beeinflussen. Da nur relativ geringe Anteile der N-Zufuhr mit Komposten düngewirksam werden (vgl. Punkt C 2.4.1), ist die Zunahme des N-Pools zu beobachten, um zu hohe N-Positivsalden zu vermeiden.

³⁵ bezogen auf ein mittleres Bodengewicht von 3.500 t/ha.

³⁶ Die Differenz von 150 kg/ha ist durch anteiligen Pflanzenentzug (der N-Entzug wird nur zu etwa 5 % aus Kompost gedeckt) und geringe Auswaschungsverluste zu erklären.

³⁷ Die Anhebungsraten widerspiegeln - ähnlich wie beim Humusgehalt - einen Gleichgewichtszustand, wie er sich im Boden im Versuchszeitraum nach intensiver Bewirtschaftung, d.h. vollständiger Abfuhr der Ernteprodukte (Korn, S.Mais und Stroh), eingestellt hat. Bei weniger intensiver Bewirtschaftung sind gering höhere N-Anreicherungen zu erwarten.

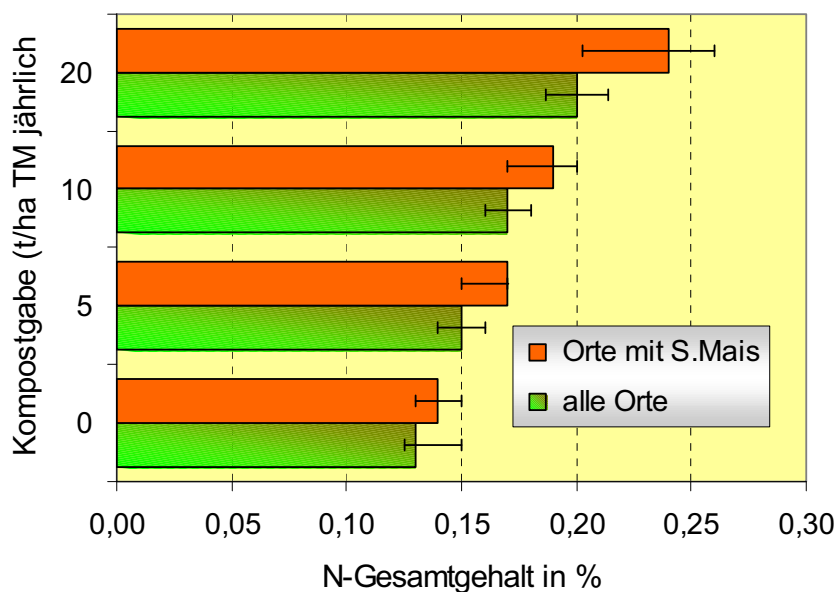


Abbildung 18 Entwicklung der N-Gesamtgehalte im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte nach 9 bzw. 12 Versuchsjahren

Balken - Mittelwerte Kompoststufen (Varianten 3, 6, 9 und 12), Jahre 2004 - 2006
alle Orte - Fo, We, St, El und He Orte mit S. Mais - St, El, He
Spannweiten - 25. bzw. 75. Quantil der Einzelwerte

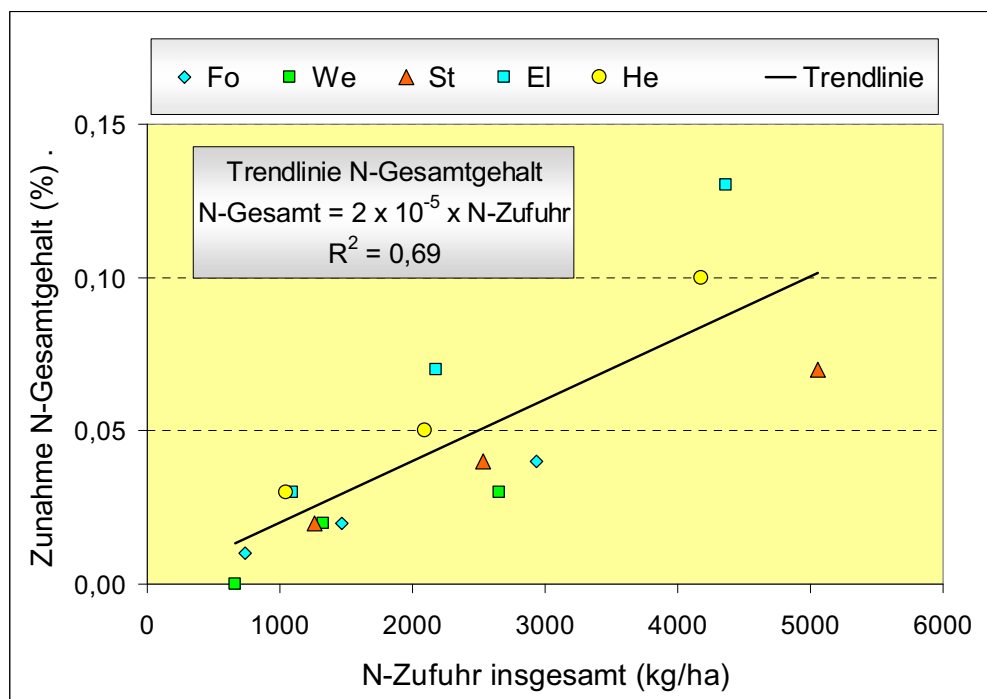


Abbildung 19 Beziehung zwischen der N-Zufuhr der Kompoststufen (jährlich 0, 5, 10 und 20 t/ha TM) insgesamt und der Zunahme des N-Gesamtgehaltes des Bodens

Mittelwerte Orte Fo, St und We (N-Zufuhr: Summe von 12 Jahren) sowie El und He (N-Zufuhr: Summe von 9 Jahren)

C 2.2.1.4 $N_{\min}$ -Gehalt

Ein möglicher Risikofaktor der regelmäßigen Kompostanwendung, der vor allem für den Boden- und Grundwasserschutz Bedeutung hat, ist das Ausmaß der N-Mineralisation der verabreichten organischen Substanz. Erste quantitative Aussagen dazu und auch eine möglichst genaue Voraussage der N-Freisetzung aus den Kompostgaben, die in der N-Düngebilanz anzurechnen ist, wurden schon im DBU-Projektbericht 2003 (ANONYM 2003A) veröffentlicht. Wesentliches Anliegen des Kompostabschlussprojektes war es, diese Resultate zu überprüfen und anhand der nun vorliegenden mittelfristigen Untersuchungen über 9 bzw. 12 Versuchsjahre zu validieren. Als geeigneter Indikator dafür wurde der $N_{\min}$ -Gehalt des Bodens³⁸ herangezogen. Er gibt in einer Art „Momentaufnahme“ Auskunft über die aktuelle Situation des löslichen Stickstoffs zum jeweiligen Probenahmezeitpunkt.

Zur Verfahrensweise:

Um möglichst belastbare Daten über die im Jahresverlauf schwankenden $N_{\min}$ -Gehalte zu gewinnen, wurden seit 1998 sämtliche Versuchsvarianten aller fünf Versuchsstandorte jährlich zu drei, für den Pflanzenbau maßgeblichen Terminen (Frühjahr vor Vegetationsbeginn, nach der Ernte sowie im Spätherbst) auf ihren $N_{\min}$ -Gehalt untersucht.

Die große Zahl von Ergebnissen aus 9 Versuchsjahren (seit 1998 über 500 Einzelergebnisse) zeigte erwartungsgemäß eine große Varianz, die durch den Witterungsverlauf, vor allem die Temperatur, die angebaute Fruchtart, die Düngung, die Kompostart und weitere Faktoren verursacht wurde. Um verallgemeinerungsfähige und belastbare, von kurzfristigen Abweichungen einzelner Versuchsjahre möglichst unabhängige Tendenzen zu erarbeiten, wurden jeweils die Mittelwerte der letzten Fruchtfolgerotation 2004 - 2006 der Versuche herangezogen. Diese Daten ergeben ein realistisches Bild darüber, wie sich die N-Freisetzung aus jährlichen Kompostgaben über Zeiträume von 9 bzw. 12 Jahren entwickelt hat. Zu den komprimierten Ergebnissen im Mittel aller Versuchsstandorte vgl. Abbildung 20 bis Abbildung 22 sowie Anhang 1, Tabelle 6-07, zu den Ergebnisse der einzelnen Standorte vgl. Anhang 1, Tabelle 1-07 bis 5-07.

Zum Verständnis von Abbildung 20 bis Abbildung 22:

Die Balken zeigen die *Differenzen*, d.h. Anhebungen (oder auch Absenkungen) der $N_{\min}$ -Gehalte, die mit den gestaffelten jährlichen Kompostgaben *im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost* (Absolutwerte im Kasten darüber) zu den drei Probenahmetermenen zu verzeichnen waren. Jede Abbildung zeigt dabei Ergebnisse bei *einer* der drei Stufen der N-Ergänzungsdüngung (N0 - ohne N-Düngung, N1 - N-Düngung von 50 % des Optimums, N2 - volle N-Düngung nach Pflanzenbedarf, vgl. auch Versuchsplan lt. Tabelle 12).

Zu den Ergebnissen im **Mittel der Versuchsstandorte**:

Insgesamt waren in der Endphase der Versuche, d.h. in den Jahren 2004 - 2006 nach inzwischen langjähriger Kompostanwendung, allmählich ansteigende $N_{\min}$ -Gehalte im Boden zu beobachten, die über das Niveau der Ergebnisse bis zum Versuchsjahr 2002 (DBU-Bericht vgl. ANONYM 2003A) hinausgingen. Das entspricht der allgemeinen Erfahrung, nach der durch die allmähliche Anhäufung von organischer Substanz im Boden, die sich auch in steigenden Humusgehalten niederschlägt, und auch infolge der dadurch erhöhten biologischen Aktivität des Bodens mit einer allmählich zunehmenden Freisetzung von mineralischem Stickstoff gerechnet

³⁸ $N_{\min}$ -Gehalt - mit 0,0125 M CaCl_2 -Lösung extrahierbarer Nitratgehalt des Bodens. Bestimmung nach Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung Baden-Württemberg - SchALVO - .

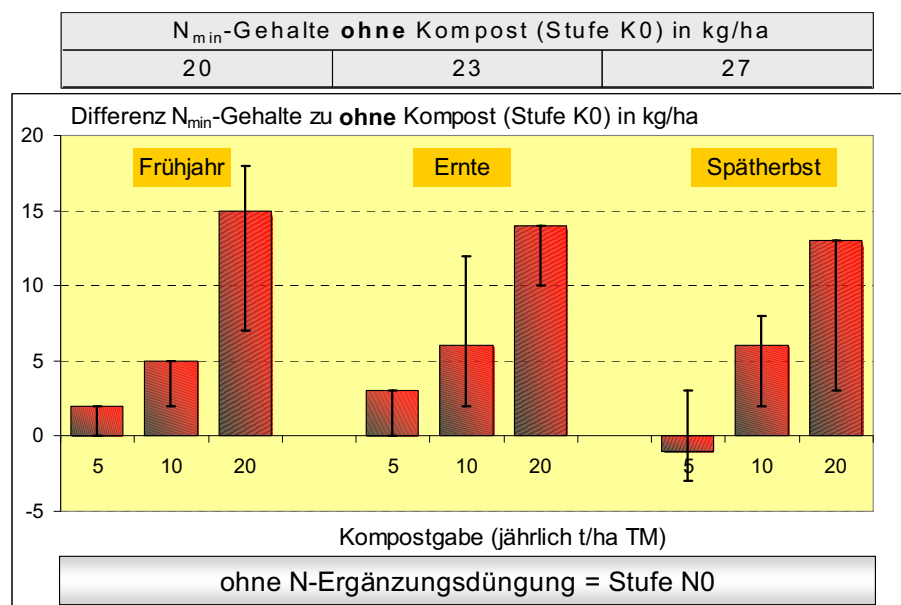


Abbildung 20 Änderung der N_{min}-Gehalte mit steigender Kompostgabe (jährlich 5, 10 und 20 t/ha TM) im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost (Stufe K0):
Varianten 1, 4, 7 und 10 **ohne** ergänzende N-Düngung (Stufe **N0**)

Termine - Frühjahr, Ernte und Spätherbst (SchALVO-Termin)
Balken - Mittel aller Orte (Fo, We, St, El, He) und Mittel der
Fruchtfolgerotation 2004-2006, insgesamt 15 Einzelwerte/ Mittelwert
Spannweiten - 35. bzw. 65. Quantil der Einzelwerte

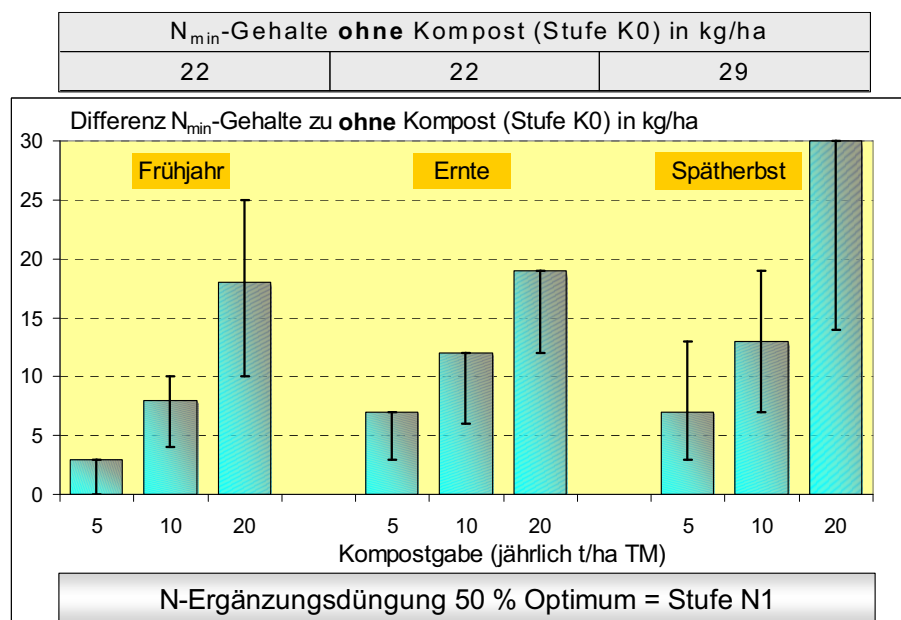


Abbildung 21 dito Abbildung 20: Varianten 2, 5, 8 und 11 mit N-Ergänzungsdüngung von **50 % des Optimums** (Stufe **N1**)

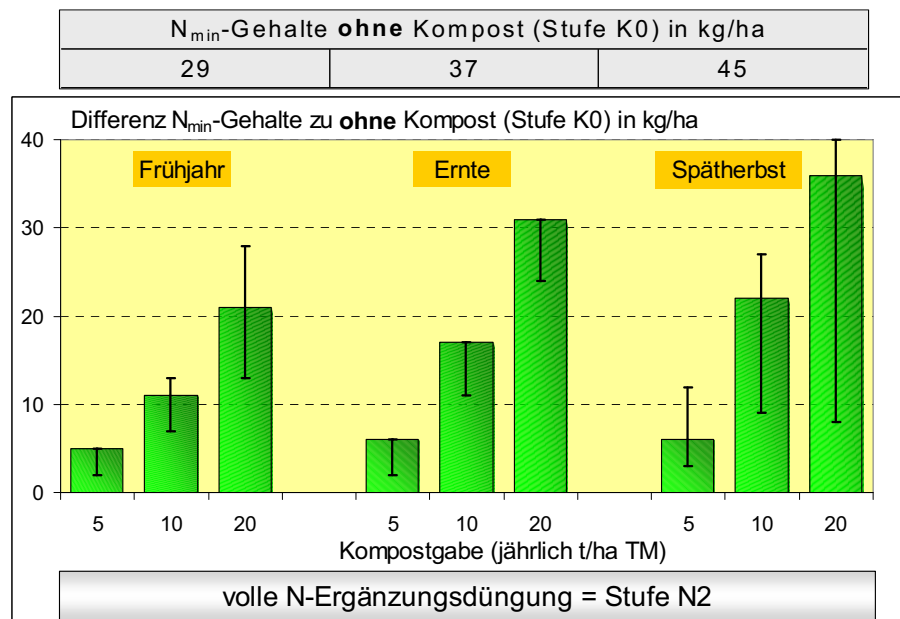


Abbildung 22 dito Abbildung 20: Varianten 3 ,6, 9 und 12 mit **voller** N-Ergänzungsdüngung (Stufe **N2**)

werden muss. Ausschlaggebend für die Risikobewertung ist dabei das *Ausmaß* der N-Freisetzung aus Kompostgaben.

Unter dieser Prämisse sind die mittleren Anhebungen der N_{min}-Gehalte des Bodens bei **fehlender N-Ergänzungsdüngung** (Stufe N0) gemäß Abbildung 20 insgesamt als noch gering und tolerierbar einzuschätzen. Das entspricht der Erfahrung, auch aus anderen Forschungsprojekten, dass der Kompost *allein*, d.h. ohne N-Ergänzung und damit bei relativ geringem Pflanzenertrag, den Stickstoff eher bindet als zügig freisetzt. So waren messbare und praktisch relevante Anhebungen der N_{min}-Gehalte von etwa 5 kg/ha erst bei den pflanzenbaulich maximal zulässigen Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM (Stufe K2) festzustellen. Lediglich sehr hohe Kompostgaben von jährlich 20 t/ha TM bewirkten im Endstadium der Versuche Steigerungen der N_{min}-Gehalte von 10 - 15 kg/ha, die ökologisch noch nicht bedenklich und deshalb beherrschbar sind. Die geringen bzw. teilweise fehlenden Ausschläge der Spannweiten des 65. Quantils sind ein Hinweis darauf, dass die hohen Mittelwerte (Balken) durch einzelne Ausschläge der Einzelwerte nach deutlich höheren N_{min}-Gehalten verursacht worden sind, wie auch aus den Einzelergebnissen, vor allem der Versuche Stockach, Ellwangen und Heidenheim mit S.Mais-Fruchtfolge hervorgeht. Hier hat es in den Jahren 2004 - 2006 im Einzelfall häufiger deutlich höhere N_{min}-Werte gegeben als im Mittel der Fruchtfolgerotation.

Mit einer zusätzlichen **N-Ergänzungsdüngung von 50 % des Optimums** (Stufe N1) fielen die N_{min}-Gehalte des Bodens erwartungsgemäß höher aus (vgl. Abbildung 21), im Mittel aber noch beherrschbar. Bei einer Kompostgabe von jährlich 5 t/ha TM bewegten sich die Anhebungen um 5 kg/ha, bei der maximal zulässigen Kompostgabe von jährlich 10 t/ha TM um 10 - 15 kg/ha. Mit überhöhten Kompostgaben von jährlich 20 t/ha TM waren Steigerungen von 15 - 20 kg/ha, zum Termin Spätherbst auch von 30 kg/ha zu verzeichnen, mit deutlichen „Ausreißen“ zu höheren Werten.

Mit einer zusätzlichen **N-Ergänzungsdüngung in Höhe des Düngungsoptimums** (Stufe N2) waren noch höhere Anhebungen der $N_{\min}$ -Gehalte festzustellen (vgl. Abbildung 22). Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die Versuchskombination „Kompost + volle N-Gabe“ den N-Düngebedarf der Kulturen übersteigt, also den gewollten „worst case“ darstellt, und nicht der „guten fachlichen Praxis“ entspricht. Die Steigerungen bewegten sich bei der niedrigen Kompostgabe (Stufe K1) unverändert um 5 kg/ha, bei der zulässigen Kompostgabe (Stufe K2) traten höhere Werte von im Mittel 10 - 20 kg/ha auf. Lediglich die höchste Kompoststufe K3 zeitigte höhere Anhebungen von 20 - 40 kg/ha, auch hier mit deutlichen „Ausreißern“ zu noch höheren Werten, die vereinzelt bei Standorten mit S.Mais-Fruchtfolge (Stockach und Heidenheim) gegen Ende des Versuchszeitraumes (2004 - 2006) zu verzeichnen waren.

Zusammenfassend erhärten die Ergebnisse nach inzwischen 9 bzw. 12jähriger Versuchsdauer die schon im DBU-Bericht 2003 getroffenen Aussage, dass der lösliche N-Pool des Bodens durch Kompostgaben allein bzw. in Kombination mit einer abgesenkten, dem Pflanzenbedarf angepassten N-Ergänzungsdüngung *nur ganz allmählich*, entsprechend der langsam einsetzenden Mineralisierung der organischen Substanz angehoben wird. Auch sehr hohe, pflanzenbaulich nicht übliche Kompostgaben verursachen unter diesen Bedingungen nachweislich keine plötzlichen und ökologisch bedenklichen Erhöhungen der $N_{\min}$ -Gehalte. Bei zu hoher N-Ergänzungsdüngung, wie im Fall der Versuchskombination „Kompost + volle N-Gabe“, sind allerdings unerwünscht hohe Anhebungen des löslichen N-Pools wahrscheinlich. Zu berücksichtigen sind dabei stets die Boden- und Klimabedingungen am Standort, die nachweislich einen großen Einfluss auf die Höhe und Verteilung der löslichen N-Anteile im Jahresverlauf haben und im Einzelfall zu deutlichen Ausschlägen, sowohl nach oben (überhöhte $N_{\min}$ -Gehalte) als auch nach unten (zeitweilige N-Immobilisierung), führen können. Mit einer zeitweiligen N-Immobilisierung ist vor allem dann zu rechnen, wenn - wie die Versuchsperiode 1998 - 2000 gezeigt hat (DBU-Bericht vgl. ANONYM 2003) - sehr hohe, für drei Jahre kumulierte Kompostgaben verabreicht werden.

Insgesamt lassen sich die Anhebungen der $N_{\min}$ -Gehalte auf moderate mittlere Werte von jährlich 5 - 15 kg/ha - und damit das *Risiko möglicher Belastungen für das Grundwasser* - begrenzen, wenn bei der regelmäßigen Kompostanwendung folgende „**Regeln guter fachlicher Praxis**“ eingehalten werden:

- Kompostgaben auf maximal 30 t/ha TM, besser 20 t/ha TM im 3jährigen Turnus begrenzen (Ziel: ausgeglichene Nährstoffsalden),
- Absenkung der ergänzenden N-Düngung um den Betrag der jährlichen N-Freisetzung aus der Kompostgabe (im Mittel 5 - 10 %, vgl. Punkt C 2.4.1) und
- Berücksichtigung standorttypischer Klima- und Bodenbedingungen (z.B. auf leichten Böden erhöhte Auswaschungsgefahr löslicher N-Anteile) und bei Bedarf Kontrollen der $N_{\min}$ -Gehalte des Bodens und restriktive Düngungsmaßnahmen (Senkung der Kompostgaben bzw. der N-Ergänzungsdüngung).

C 2.2.1.5 Heißwasserlösliche Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte des Bodens und Beschaffenheit der organischen Bodensubstanz

Zur Methodik:

Für die Untersuchungen wurden jeweils Versuchsvarianten bei voller N-Düngung (Stufe N2) ausgewählt: V3 (ohne Kompost), V9 (Kompostgabe jährlich 10 t/ha TM) und V12 (Kompostgabe jährlich 20 t/ha TM). Nach Versuchsabschluss 2006 wurden auf allen 5 Versuchsstandorten in den 4 Wiederholungen/ Variante Bodenproben aus 0 - 20 cm Bodentiefe entnommen und auf die heißwasserlöslichen Gehalte an Kohlenstoff und Stickstoff untersucht (vgl. Tabelle 15). Ausführliche Ergebnisauswertung vgl. Anhang 2, Teil 1.

Die Bodengehalte an heißwasserlöslichem organischen Kohlenstoff (C_{hwl}) werden durch steigende Kompostgaben erhöht (vgl. Tabelle 21) und zeigen damit ähnliche Reaktionen wie die C_{org} -Bodengehalte (vgl. Punkt C 2.2.1.2). Bei den Versuchen mit K.Mais-Fruchtfolge (Forchheim, Weierbach) fallen die Anstiege geringer aus und sind nur für die höchste Kompostgabe statistisch zu sichern. Dagegen sind in den Versuchen mit S.Mais-Fruchtfolge (Stockach, Ellwangen, Heidenheim) sehr deutliche Anhebungen der C_{hwl} -Gehalte zu beobachten, die durchweg statistisch hoch gesichert sind. Das ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die höhere biologische Aktivität der Böden dieser Standorte schon zu Versuchsbeginn bzw. auf die teils geringere Abbaustabilität der eingesetzten Komposte (Stockach, Heidenheim) zurückzuführen, durch die die zugeführten Mengen an organischer Substanz der gestaffelten Kompostgaben stärker mobilisiert wurden.

Tabelle 21 Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die C_{hwl} -Bodengehalte

Standort	Kompostgabe		C_{hwl} [mg/kg TS]	Irrtumswahrscheinlichkeit (p)		
	Qualität	t TM/ha*a	Mittelwert	0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	491		0,50	0,01
		10	549	0,50		0,06
		20	620	0,01	0,06	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	814		0,06	0,00
		10	884	0,06		0,27
		20	951	0,00	0,27	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	496		0,00	0,00
		10	689	0,00		0,00
		20	903	0,00	0,00	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	506		0,00	0,00
		10	740	0,00		0,00
		20	929	0,00	0,00	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	531		0,00	0,00
		10	750	0,00		0,00
		20	996	0,00	0,00	

Legende: Varianzanalytische Auswertung mit Newman-Keuls-Test
 Fettdruck – Irrtumswahrscheinlichkeit (p) <0,05 = gesichert verschieden
 Mittlere Ablehnungsschwelle bei $p < 0,05 = \pm 98$

Eine erste Bewertung anhand eines Bewertungsschlüssels von KÖRSCHENS und SCHULZ (1999) zeigt, dass die in den Versuchen ermittelten C_{hwl} -Bodengehalte durchweg als sehr hoch einzustufen wären (vgl. Anhang 2, Teil 1). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der o.g.

Bewertungsschlüssel aus Untersuchungen in ostdeutschen Trockenregionen abgeleitet worden ist, ohne eine Differenzierung nach Bodenarten, Klimaeinflüssen oder Düngung vorzunehmen. Unter den klimatischen Verhältnissen Baden-Württembergs scheinen grundsätzlich höhere C_{hwl} -Bodengehalte aufzutreten. Das ist ein Beleg dafür, dass in die Bewertung - ähnlich wie bei den C_{org} -Bodengehalten - die Standort- und Klimabedingungen einzubeziehen sind, um zu belastbaren Aussagen zu gelangen.

Der heißwasserlösliche Stickstoffgehalt des Bodens (N_{hwl}) läuft mit den C_{hwl} -Bodengehalten weitgehend parallel, d.h. auch hier steigen die Gehalte mit zunehmender Kompostgabe überwiegend statistisch gesichert an, besonders deutlich in den Versuchen mit S.Mais-Fruchtfolge (Stockach, Ellwangen, Heidenheim) (vgl. Tabelle 22). Lediglich bei dem nährstoffarmen Grüngutfertigkompost (Standort Weierbach) konnte kein statistischer Zusammenhang zu den Kompostgaben abgeleitet werden.

Tabelle 22 Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die N_{hwl} -Bodengehalte

Standort	Kompostgabe		N_{hwl} [mg/kg TS]	Irrtumswahrscheinlichkeit (p)		
	Qualität	t TM/ha*a		0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	48,3		0,25	0,04
		10	52,7	0,25		0,18
		20	57,9	0,04	0,18	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	68,0		0,28	0,05
		10	73,8	0,28		0,28
		20	78,0	0,05	0,28	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	40,6		0,00	0,00
		10	62,6	0,00		0,00
		20	85,1	0,00	0,00	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	40,9		0,00	0,00
		10	63,9	0,00		0,00
		20	81,0	0,00	0,00	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	47,0		0,00	0,00
		10	69,3	0,00		0,00
		20	91,4	0,00	0,00	

Legende: Varianzanalytische Auswertung mit Newman-Keuls-Test
 Fettdruck – Irrtumswahrscheinlichkeit (p) <0,05 = gesichert verschieden
 Mittlere Ablehnungsschwelle bei $p < 0,05 = \pm 10,3$

Die C/N-Verhältnisse in den Heißwasserextrakten zeigen im Allgemeinen keine gerichtete und gesicherte Abhängigkeit von den Kompostgaben (vgl. Tabelle 23). Nur im Versuch Stockach (Bioabfall-Frischkompost) ist eine gesicherte Abnahme mit steigender Kompostzufuhr festzustellen. Das ist sehr wahrscheinlich auf die im Brikkolare-Verfahren sehr schwach angerotteten Komposte zurückzuführen. Sie unterliegen im Boden einem verstärkten mikrobiologischen Abbau, der vor allem CO_2 freisetzt und Stickstoff anteilig biologisch fixiert, was zu einem engeren C/N-Verhältnis führt. Die stärker zersetzten Komposte der übrigen Versuche reagierten wegen ihrer höheren Abbaustabilität nicht in diese Richtung.

Aus den heißwasserlöslichen Kohlenstoffgehalten kann der Gehalt an umsetzbarem organischen Kohlenstoff (C_{ums}) im Boden abgeleitet werden. Der C_{ums} -Bodengehalt errechnet sich nach KÖRSCHENS und SCHULZ (1999) wie folgt:

$$C_{ums} = 15 \cdot C_{hwl}$$

Wird der C_{ums} -Bodengehalt in Relation zu den gesamten C_{org} -Bodengehalten gesetzt, so zeigen sich für extreme Kompostqualitäten gegenläufige Wirkungen, die sogar statistisch gesichert werden konnten (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 23 Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf das C_{hwl}/N_{hwl} -Verhältnis

Standort	Kompostgabe		C_{hwl}/N_{hwl}	Irrtumswahrscheinlichkeit (p)		
	Qualität	t TM/ha*a		0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	10,27		0,61	0,56
		10	10,44	0,61		0,70
		20	10,70	0,56	0,70	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	11,99		0,97	0,53
		10	11,97	0,97		0,78
		20	12,19	0,53	0,78	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	12,21		0,01	0,00
		10	11,00	0,01		0,75
		20	10,61	0,00	0,75	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	12,40		0,15	0,09
		10	11,59	0,15		0,72
		20	11,47	0,09	0,72	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	11,38		0,33	0,33
		10	10,82	0,33		0,78
		20	10,91	0,33	0,78	

Legende: Varianzanalytische Auswertung mit Newman-Keuls-Test
Fettdruck – Irrtumswahrscheinlichkeit (p) <0,05 = gesichert verschieden
Mittlere Ablehnungsschwelle bei p<0,05 = ± 0,87

Tabelle 24 Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die Relation C_{ums} in % C_{org}

Standort	Kompostgabe		C_{ums} in C_{org} -%	Irrtumswahrscheinlichkeit (p)		
	Qualität	t TM/ha*a		0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	61,9		0,31	0,38
		10	56,4	0,31		0,99
		20	56,1	0,38	0,99	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	60,7		0,52	0,00
		10	56,2	0,52		0,08
		20	49,3	0,00	0,08	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	59,2		0,54	0,01
		10	62,7	0,54		0,03
		20	68,5	0,01	0,03	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	46,7		0,81	0,24
		10	46,0	0,81		0,25
		20	51,0	0,24	0,25	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	52,1		0,25	0,18
		10	57,6	0,25		0,76
		20	58,4	0,18	0,76	

Legende: Varianzanalytische Auswertung mit Newman-Keuls-Test
Fettdruck – Irrtumswahrscheinlichkeit (p) <0,05 = gesichert verschieden
Mittlere Ablehnungsschwelle bei p<0,05 = ± 7,1

Wesentlich deutlicher als der umsetzbare Anteil des organischen Kohlenstoffs wird der umsetzbare Anteil von Gesamtstickstoff im Boden (N_{ums}) durch die Kompostgaben beeinflusst (vgl. Tabelle 25). Dabei spielt anscheinend der standorttypische Anteil an umsetzbarem Stickstoff eine wesentliche Rolle. Für die Versuchsstandorte mit S.Mais-Fruchtfolge (Stockach, Ellwan-

gen, Heidenheim) wurden umsetzbare Stickstoffanteile von etwa 30 bis 40 % des Gesamtstickstoffs im Boden nachgewiesen. In Forchheim und Weierbach (K.Mais-Fruchtfolge) lagen diese deutlich über 50 %.

Tabelle 25 Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die Relation N_{ums} in % N_t

Standort	Kompostgabe		N_{ums} in N_t -%	Irrtumswahrscheinlichkeit (p)		
	Qualität	t TM/ha*a		0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	62,8		0,07	0,05
		10	57,8	0,07		0,57
		20	56,3	0,05	0,57	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	53,2		0,70	0,42
		10	54,3	0,70		0,36
		20	49,9	0,42	0,36	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	37,4		0,04	0,00
		10	44,6	0,04		0,06
		20	51,4	0,00	0,06	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	30,8		0,19	0,05
		10	34,3	0,19		0,42
		20	38,3	0,05	0,42	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	36,2		0,06	0,01
		10	43,1	0,06		0,53
		20	45,9	0,01	0,53	

Legende: Varianzanalytische Auswertung mit Newman-Keuls-Test
 Fettdruck – Irrtumswahrscheinlichkeit (p) < 0,05 = gesichert verschieden
 Mittlere Ablehnungsschwelle bei $p < 0,05 = \pm 7,1$

Die Böden mit geringen N_{ums} -Anteilen am Gesamtstickstoff reagierten auf die Kompostgaben mit gesicherter Zunahme an N_{ums} , die mit hohen Ausgangsanteilen mit einer gesicherten Abnahme an N_{ums} . Bei den höchsten Kompostgaben (jährlich 20 t/ha TM) kam es zu einer weitgehenden Annäherung des umsetzbaren Stickstoffanteils im Boden. Die Bodenunterschiede wurden durch hohe Kompostgaben hinsichtlich ihres Stickstofffreisetzungsverhaltens annähernd ausgeglichen.

Auf den inerten oder umsatzträgen organischen Kohlenstoff (C_{inert}) kann wie folgt geschlossen werden:

$$C_{inert} = C_{org} - C_{ums}$$

Der inerte oder umsatzträge organische Kohlenstoff ist nur in geringem Maße und meist über längere Zeiträume an den mikrobiologischen Ab-, Um- und Aufbauprozessen im Boden beteiligt. Er ist stark in Ton-Humus-Komplexen gebunden und wird vorwiegend bodenphysikalisch wirksam.

Für alle Versuchsstandorte ist eine Zunahme der C_{inert} -Bodengehalte in Abhängigkeit von den steigenden Kompostgaben erkennbar (vgl. Tabelle 26). Deutlich und statistisch gesichert ist sie jedoch nur bei Anwendung von Fertigkomposten auf mittleren bis schwerem Böden. Die stärkste Anhebung der C_{inert} -Bodengehalte konnte am Standort Weierbach durch Anwendung von Grüngut-Fertigkompost erzielt werden. Auf dem sandigen Boden Forchheim und auch beim Einsatz von Frischkompost in Stockach waren keine gesicherten Tendenzen zu beobachten.

In der Regel wird für die Humusreproduktion nach VDLUFA-Standpunkt davon ausgegangen, dass bei ausgeglichenem Humussaldo keine dauerhafte Anhebung der C_{inert} -Bodengehalte er-

folgt. Für die Anwendung stärker zersetzter Bioabfallkomposte auf lehmigen bis schluffigen Standorten konnte in diesem Projekt jedoch eine darüber hinausgehende Wirkung (Dauerhumusanreicherung) gesichert nachgewiesen werden.

Tabelle 26 Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die C_{inert} -Bodengehalte

Standort	Kompostgabe		C_{inert} in TS-%	Irrtumswahrscheinlichkeit (p)		
	Qualität	t TM/ha*a		0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	0,45		0,40	0,14
		10	0,64	0,40		0,45
		20	0,73	0,14	0,45	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	0,81		0,13	0,00
		10	1,08	0,13		0,00
		20	1,48	0,00	0,00	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	0,51		0,37	0,55
		10	0,61	0,37		0,89
		20	0,63	0,55	0,89	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	0,87		0,00	0,00
		10	1,30	0,00		0,65
		20	1,35	0,00	0,65	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	0,73		0,64	0,03
		10	0,83	0,64		0,10
		20	1,06	0,03	0,10	

Legende: Varianzanalytische Auswertung mit Newman-Keuls-Test
Fettdruck – Irrtumswahrscheinlichkeit (p) <0,05 = gesichert verschieden
Mittlere Ablehnungsschwelle bei $p < 0,05 = \pm 0,30$

Wird für Stickstoff von den gleichen Beziehungen der Gesamtgehalte zu den heißwasserlöslichen Gehalten wie beim organischen Kohlenstoff im Boden ausgegangen, so kann für den umsatzträgen bzw. inerten Stickstoff (N_{inert}) festgestellt werden:

Sämtliche geprüften Komposte führten zu statistisch gesicherten Zunahmen von inertem Stickstoff im Boden (vgl. Tabelle 27). Dieser Stickstoff verbleibt über eine längere Zeit im Boden, ohne wesentlich in die bodeninternen Stoffumsätze einbezogen zu werden. Das erklärt auch die in den Versuchen des vorliegenden Projektes (vgl. Punkt A 2.2.3) und anderen Kompostanwendungsversuchen bestätigte geringe Stickstoff-Düngewirkung der Stickstofffrachten aus Kompostmaterial. Über die Dauer des Verbleibs von Stickstoff in der umsatzträgen bzw. inerten organischen Bodensubstanz kann über die hier ausgewerteten 9 bzw. 12jährigen Versuchsreihen hinaus noch keine gesicherte Aussage erfolgen. Es ist aber damit zu rechnen, wie die Auswertungen der N-Düngewirksamkeit von Komposten gezeigt haben (vgl. Punkt C 2.4.1), dass sich die N-Mineralisierung auch mittelfristig in kleinen jährlichen Raten ähnlich dem Humusabbau bewegen wird.

Zusammenfassend kann zur Beeinflussung der qualitativen Beschaffenheit der organischen Bodensubstanz durch Anwendung von Bioabfall- und Grüngutkomposten folgendes festgestellt werden:

- Die Kompostgaben können zu wesentlichen Änderungen in Menge und Beschaffenheit der organischen Bodensubstanz beitragen, weil die mit der Kompostanwendung verbundenen Nährstofffrachten kaum aufwandsbeschränkend wirken.

Tabelle 27 Einfluss gestaffelter Kompostgaben auf die N_{inert} -Bodengehalte

Standort	Kompostgabe		N_{inert} in TS-%	Irrtumswahrscheinlichkeit (p)		
	Qualität	t TM/ha*a		0	10	20
Forchheim	Fertigkompost Biotonne	0	0,042		0,03	0,00
		10	0,058	0,03		0,20
		20	0,067	0,00	0,20	
Weierbach	Fertigkompost Grüngut	0	0,090		0,59	0,00
		10	0,093	0,59		0,01
		20	0,117	0,00	0,01	
Stockach	Frischkompost Biotonne	0	0,102		0,04	0,04
		10	0,117	0,04		0,80
		20	0,121	0,04	0,80	
Ellwangen	Fertigkompost Biotonne	0	0,137		0,00	0,00
		10	0,184	0,00		0,07
		20	0,197	0,00	0,07	
Heidenheim	Frischkompost Biotonne	0	0,124		0,15	0,00
		10	0,138	0,15		0,00
		20	0,161	0,00	0,00	

Legende: Varianzanalytische Auswertung mit Newman-Keuls-Test
 Fettdruck – Irrtumswahrscheinlichkeit (p) < 0,05 = gesichert verschieden
 Mittlere Ablehnungsschwelle bei p < 0,05 = ± 0,019

- Kompostgaben erhöhen nicht nur die Gehalte an umsetzbarer organischer Bodensubstanz, sondern auch deren inerte bzw. umsatzträgen Anteile. Das betrifft vor allem Fertigkomposte, insbesondere aus Grüngut.
- Frischkomposte erhöhen den Anteil an umsetzbarer organischer Substanz in der gesamten organischen Bodensubstanz. Das gilt sowohl für organischen Kohlenstoff, aber insbesondere für umsetzbaren organischen Stickstoff.
- Das C/N-Verhältnis im Boden wird durch Kompostanwendung wesentlich geringer beeinflusst als andere humusrelevante Faktoren. Dabei sind vereinzelte Zunahmen für das C/N-Verhältnis der Gesamtgehalte (z.B. Grüngut) und vereinzelte Senkungen für das C/N-Verhältnis der umsetzbaren organischen Substanz aufgetreten (z.B. Bioabfall-Frischkompost).
- Die Zunahme des gebundenen Stickstoffs (N_{inert}) bei Kompostanwendung unterstützt die bei der Ableitung der N-Düngewirksamkeit von N-Zufuhren mit Kompostgaben getroffene Einschätzung und Festlegung (vgl. Punkt A 4.2), dass der N-Überhang gemäß §5 (3) Anlage 6 (Zeile 5) Düng-Verordnung als *unvermeidbarer N-Überschuss* zulässig ist und im N-Düngevergleich nicht berücksichtigt werden muss, da zu erwarten ist, dass er im Boden nur allmählich in der Größenordnung der N-Mineralisierung des Humusanteiles mobilisiert wird. Unabhängig davon muss stets versucht werden, diesen unvermeidbaren N-Überhang bei Kompostanwendung im Interesse eines nachhaltigen Gewässerschutzes so gering wie möglich zu halten und die über die Mineralisation frei werdenden Mengen an Stickstoff über N_{min} -Untersuchungen des Bodens in die Berechnung des Düngedarfs einzubeziehen.

C 2.2.1.6 Lösliche Gehalte an Phosphor, Kalium und Magnesium

Die Entwicklung der löslichen Gehalte des Bodens an Phosphor (P_2O_5), Kalium (K_2O) bzw. Magnesium (Mg) nach 6 - 9 bzw. 9 - 12jähriger Kompostanwendung zeigen Abbildung 23, Abbildung 24 bzw. Abbildung 25 im Mittel aller Versuchsorte (links) bzw. der Orte mit S.Mais-Fruchtfolge (rechts) (Einzelergebnisse vgl. Anhang 1, Tabellen 1-05 bis 6-05, Blätter P_2O_5 , K_2O und Mg).

Bei **Phosphor** und **Kalium** sind allgemein deutliche Steigerungen der löslichen Gehalte als Folge der gestaffelten Kompostgaben festzustellen. Die Gehalte in den Kontrollvarianten K0 (Variante 3 - ohne Kompost bei voller N-Düngung) sind dabei im Vergleich zu Versuchsbeginn im Laufe der Jahre spürbar abgesunken, bedingt durch Pflanzenentzüge bei hohen Erträgen und die über Jahre fehlende Erhaltungsdüngung, bei dem leichter löslichen Kalium aber auch verstärkt durch die Auswaschungsverluste.

Die **Phosphorgehalte** des Bodens sanken im Mittel aller Versuche in der Kontrollvariante K0 um etwa 5 mg/100 g im Vergleich zur Ausgangssituation, vor allem bedingt durch erhebliche Absenkungen auf dem leichten Standort Forchheim. Auf den schwereren Böden der drei Versuche mit S.Mais-Fruchtfolge war der Gehaltsabfall mit etwa 3 mg/100 g weniger deutlich. Die regelmäßigen Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM haben die Phosphorverluste im Mittel ausgleichen können, in den Versuchen mit Silomais auf Grund der deutlich höheren Zufuhren von jährlich 110 - 120 kg/ha P_2O_5 (vgl. Abbildung 11) sogar schon bei der niedrigen Kompostgabe von jährlich 5 t/ha TM. Die sehr hohe Kompostgabe von jährlich 20 t/ha TM hat zu deutlichen Anhebungen der Phosphorgehalte über den Ausgangsgehalt hinaus geführt: im Mittel aller Orte um 6 mg/100 g, in den S.Maisversuchen sogar um 9 mg/100 g.

Die **Kaliumgehalte** des Bodens gingen in der Kontrollvariante K0 im Vergleich zum Ausgangsgehalt zu Beginn der Versuche noch deutlicher zurück als die Phosphorgehalte, neben den hohen Kaliumentzügen vorrangig bedingt durch die höheren Auswaschungsverluste. So lagen die Gehalte im Mittel aller Versuche und auch bei den Versuchen mit S.Mais-Fruchtfolge um etwa 11 mg/100 g unter den Ausgangsgehalten. Das frühere Gehaltsniveau konnte erst durch eine pflanzenbaulich maximale Kompostgabe von jährlich 10 t/ha TM (Stufe K2) gehalten und leicht überschritten werden. Die niedrigere Kompostgabe von jährlich 5 t/ha TM reichte dazu nicht aus, konnte aber die Gehaltsrückgänge im Vergleich zur Kontrolle K0 abmildern. Sehr hohe Kompostgaben von jährlich 20 t/ha TM bewirkten dagegen, ähnlich wie bei Phosphor, deutliche Anhebungen der Kaliumgehalte um 9 mg/100 g (Mittel aller Versuche) bzw. sogar 16 mg/100 g (Mittel der S.Maisversuche).

Im Unterschied zu Phosphor und Kalium zeigten die hohen Mg-Zufuhren der gestaffelten Kompostgaben (vgl. Abbildung 11) nur relativ geringe Auswirkungen auf die löslichen Magnesiumgehalte des Bodens. Auch die Gehalte der Kontrollvariante K0 gingen nicht zurück, sondern bewegten sich am Versuchsende auf dem Niveau der Gehalte zu Versuchsbeginn von 8 - 9 mg/100 g. Auf allen Versuchen sind aber, wie die Mittelwerte (vgl. Abbildung 25) und auch die Einzelergebnisse belegen, bei hohen Kompostgaben (Stufen K2 und K3) leichte Anhebungen von im Mittel 1 - 2 mg/100 g zu verzeichnen. Sie sind jedoch, wie die Streuungen zeigen, statistisch kaum zu sichern.

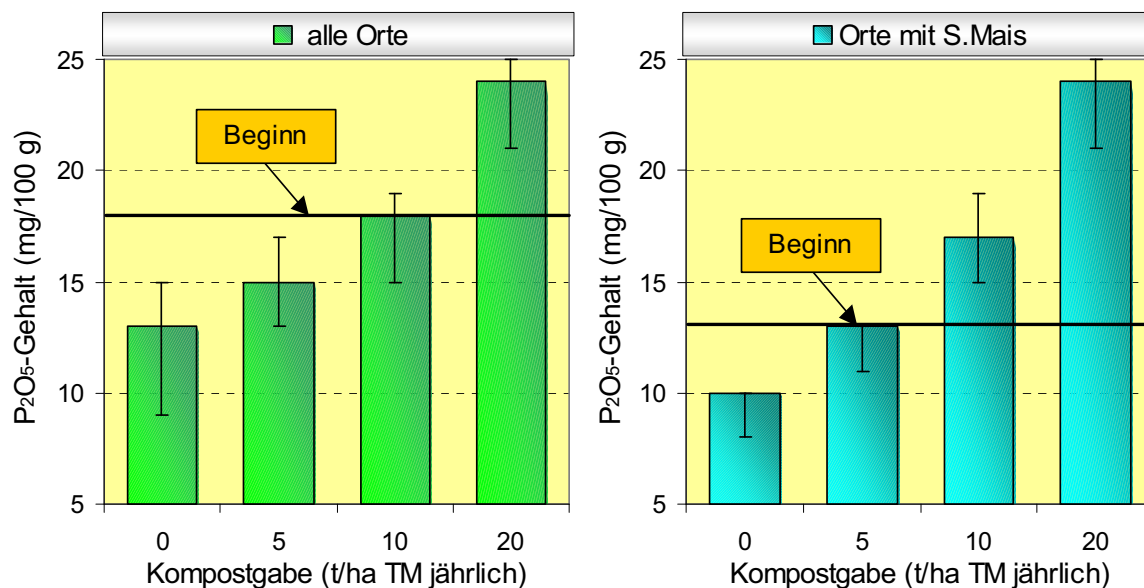


Abbildung 23 Entwicklung des P_2O_5 -Gehaltes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte nach 6 - 9 bzw. 9 - 12 Versuchsjahren

Balken - Mittelwerte Kompoststufen (Varianten 3, 6, 9 und 12), Jahre 2004 - 2006
alle Orte - Fo, We, St, El und He Orte mit S. Mais - St, El, He
Spannweiten - 25. bzw. 75. Quantil der Einzelwerte
Beginn - Gehalte zu Versuchsbeginn
(Orte Fo, We, St: 1995-1997, Orte El, He: 1998-2000)

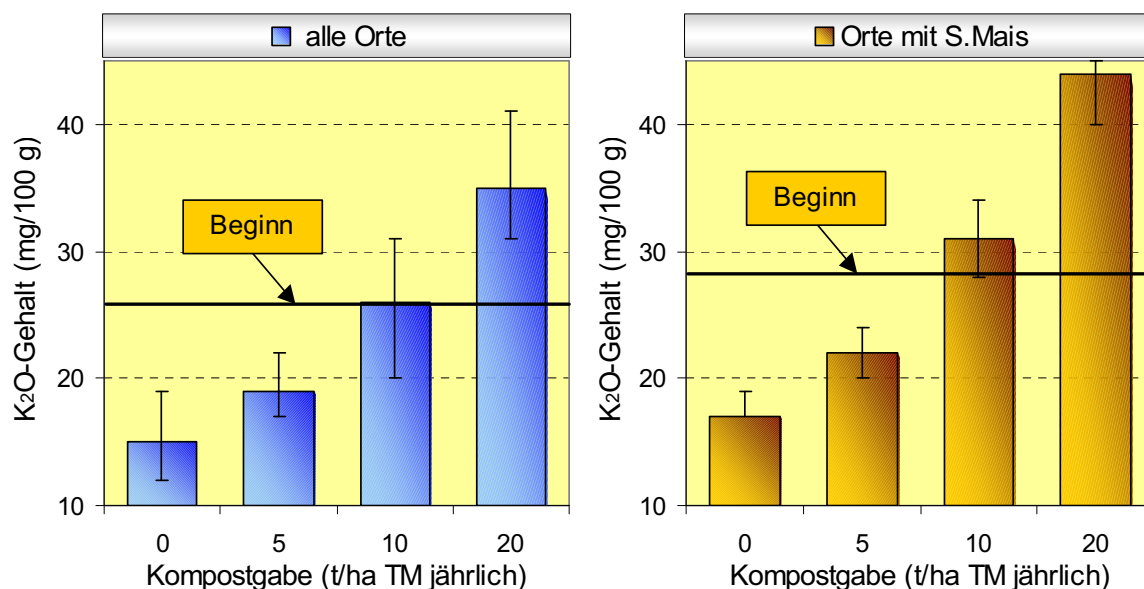


Abbildung 24 Entwicklung des K_2O -Gehaltes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe: Mittel aller Versuchsorte nach 6 - 9 bzw. 9 - 12 Versuchsjahren

Legende vgl. Abbildung 23

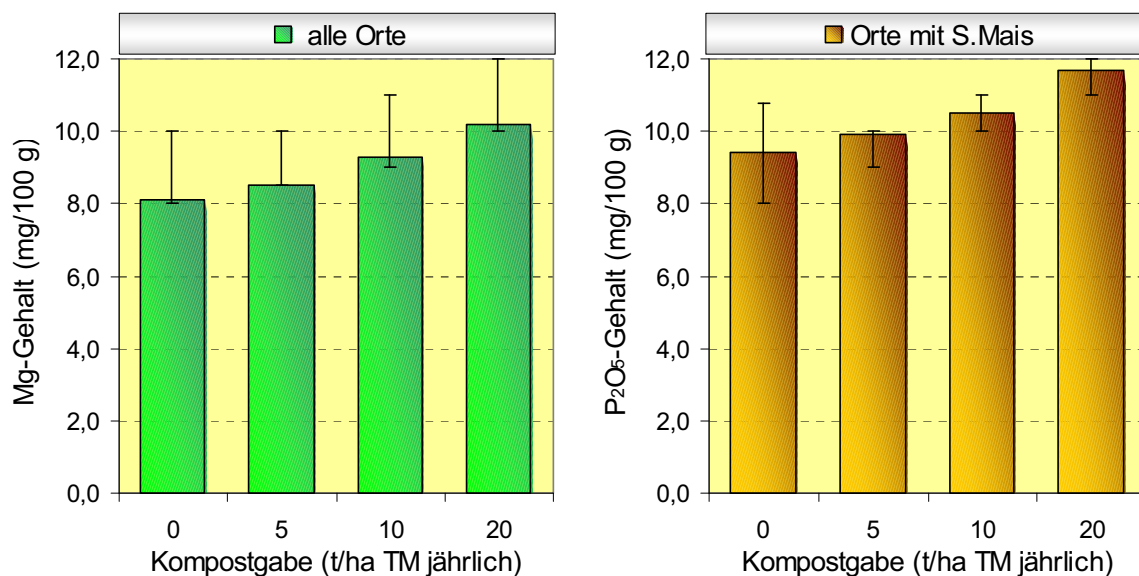


Abbildung 25 Entwicklung des Mg-Gehaltes im Boden in Abhängigkeit von der Kompostgabe:
 Mittel aller Versuchsorte nach 6 - 9 bzw. 9 - 12 Versuchsjahren

Legende vgl. Abbildung 23. Gehalte zu Versuchsbeginn: 8 bzw. 9 mg/100 g

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die erheblichen Zufuhren an Phosphor und Kalium bei regelmäßigen Kompostgaben in pflanzenbaulich optimaler Höhe (20 - 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus) die Versorgung der Böden mit diesen essenziellen Nährstoffen stabil halten und sogar noch verbessern und ein Absinken der pflanzenverfügbaren Gehalte verhindern können. Damit haben sie, schon angesichts der Ergebnisse der Bodenversorgung, den Wert einer Grund- bzw. Erhaltungsdüngung (**Einsparpotenzial**). Gleichzeitig bilden aber diese Zufuhren den begrenzenden Faktor der Kompostanwendung, wenn dadurch Anstiege der pflanzenverfügbaren Bodengehalte bis in hohe Versorgungsbereiche (Stufen D - hoch und E - sehr hoch) bewirkt werden, in denen eine weitere Zufuhr, ausgehend von den Vorgaben der Düngeverordnung, nicht zulässig ist. Damit ist vor allem bei deutlichen Positivsalden zu rechnen. Auch die Magnesiumversorgung des Bodens wird, wenn auch nicht in dem ausgeprägten Maße wie bei Kalium und Phosphor, mittelfristig positiv beeinflusst. Der hohe Positivsaldo ist unter dem Gesichtspunkt, dass damit der permanenten Mg-Auswaschung aus dem Boden entgegengewirkt wird, der lösliche Mg-Anteil im Boden keinesfalls phytotoxische Grenzen erreicht und eine hohe Mg-Versorgung im Boden zweckmäßig ist, durchaus als Vorteil einzuschätzen. Zur Wirkung der Nährstoffzufuhren auf die *Gehalte in den Ernteprodukten* und ihrer *Düngeeffizienz* vgl. Punkte C 2.3.1 und C 2.4.2.

C 2.2.1.7 Schwermetallgehalte

Ein wesentliches Anliegen einer nachhaltigen Kompostanwendung ist es, die damit verbundenen unvermeidliche Schwermetallzufuhr so gering wie möglich zu halten, um im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes eine Verschlechterung der geogen gegebenen Schwermetallsituation der Ackerböden unbedingt zu vermeiden. Die Kompost-Anwendungsversuche boten eine gute Gelegenheit, diese Frage quantitativ zu überprüfen und damit das Risiko einer möglichen Schwermetallkontamination der Böden objektiv zu beurteilen.

Zur Verfahrensweise:

Seit 1995 wurden auf allen Versuchsstandorten in größeren Abständen und seit 2000 bis zum Versuchsabschluss 2006 jährlich sämtliche Versuchsvarianten auf die **Schwermetall-Gesamtgehalte des Bodens** (SM-Gehalte) untersucht. In den einzelnen Versuchsjahren waren dabei meist deutliche Schwankungen der 4 Wiederholungen/ Versuchsvariante zu verzeichnen, die auf die Probenahme (Bodeninhomogenitäten) zurückzuführen und nicht vermeidbar sind. Um belastbare, von kurzfristigen Abweichungen einzelner Versuchsjahre möglichst unabhängige Tendenzen abzuleiten, wurden deshalb jeweils die Varianten-Mittelwerte der letzten Fruchtfolgerotation 2004 - 2006 der Versuche herangezogen. Diese Daten vermitteln ein realistisches und von außergewöhnlichen Schwankungen bereinigtes Bild darüber, wie sich die SM-Gehalte des Bodens nach jährlichen Kompostgaben über Zeiträume von 9 bzw. 12 Jahren entwickelt haben.

Die komprimierten Ergebnisse zu den Veränderungen der SM-Gehalte im Versuchszeitraum zeigt **Abbildung 26** (Einzelergebnisse der Versuchsstandorte vgl. Anhang 1, Tabellen 1-06 bis 6-06).

Zum Verständnis der Abbildung:

Die Balken der einzelnen Graphiken stellen jeweils die *Anhebungen* bzw. auch *Absenkungen* der SM-Gehalte der fünf Versuchsstandorte mit steigenden Kompostgaben (links – 5, Mitte – 10, rechts - 20 t/ha TM) nach 9 bzw. 12 Versuchsjahren im Vergleich zu den *absoluten Basisgehalten* der *Varianten ohne Kompost* (Stufe K0) dar, die in der Legende oberhalb der Graphiken angegeben werden. Wenn Balken fehlen (häufig bei 5 t/ha TM), war im Versuchszeitraum keine Veränderung zu verzeichnen (Wert 0). Die Streubreite der Einzelwerte (jeweils links dargestellt) gibt stets die *mittlere Streuung* der Einzelwerte (35 % bis 75 % aller Einzelwerte) um den Variantenmittelwert an. Sie ermöglicht es einzuschätzen, ob eine Veränderung der SM-Gehalte in Abhängigkeit von der Kompostanwendung objektiv stattgefunden hat bzw. ob die Veränderung innerhalb der Streuung liegt und damit nicht gesichert ist.

Die **Ergebnisse** und ihre Bewertung:

Die SM-Gehalte der Böden haben sich - mit Ausnahme von Cu und Zn - auf allen Versuchsstandorten im Versuchszeitraum von 9 bzw. 12 Jahren durch die regelmäßige Kompostanwendung nicht verändert.

Das trifft ohne Einschränkung auf die unerwünschten Schwermetalle Pb, Cd, Cr, Ni und Hg für alle Kompoststufen, auch die überhöhte Gabe von jährlich 20 t/ha TM (!) zu. Die Pb-Gehalte weisen erst ab der Kompoststufe K2 aufwärts minimale, noch innerhalb der Streuung liegende Anhebungen von 1 – 2 mg/kg auf. Die Cd-Gehalte schwanken durchweg geringfügig um den Nullpunkt. Die Cr- und Ni-Gehalte zeigen sogar bei höheren Kompostgaben negative Abweichungen vom Basiswert ohne Kompost, die aber, angesichts der Streubreite der Einzelwerte, nur als Streuung und nicht als Absenkung zu bewerten sind. Die Hg-Gehalte bleiben unverändert bzw. steigen nur minimal um 0,01 mg/kg an, deutlich unterhalb der angegebenen Streubreite.

C Ergebnisse
C 2 Kompostwirkungen in den Anwendungsversuchen
C 2.2 Wirkungen auf den Boden

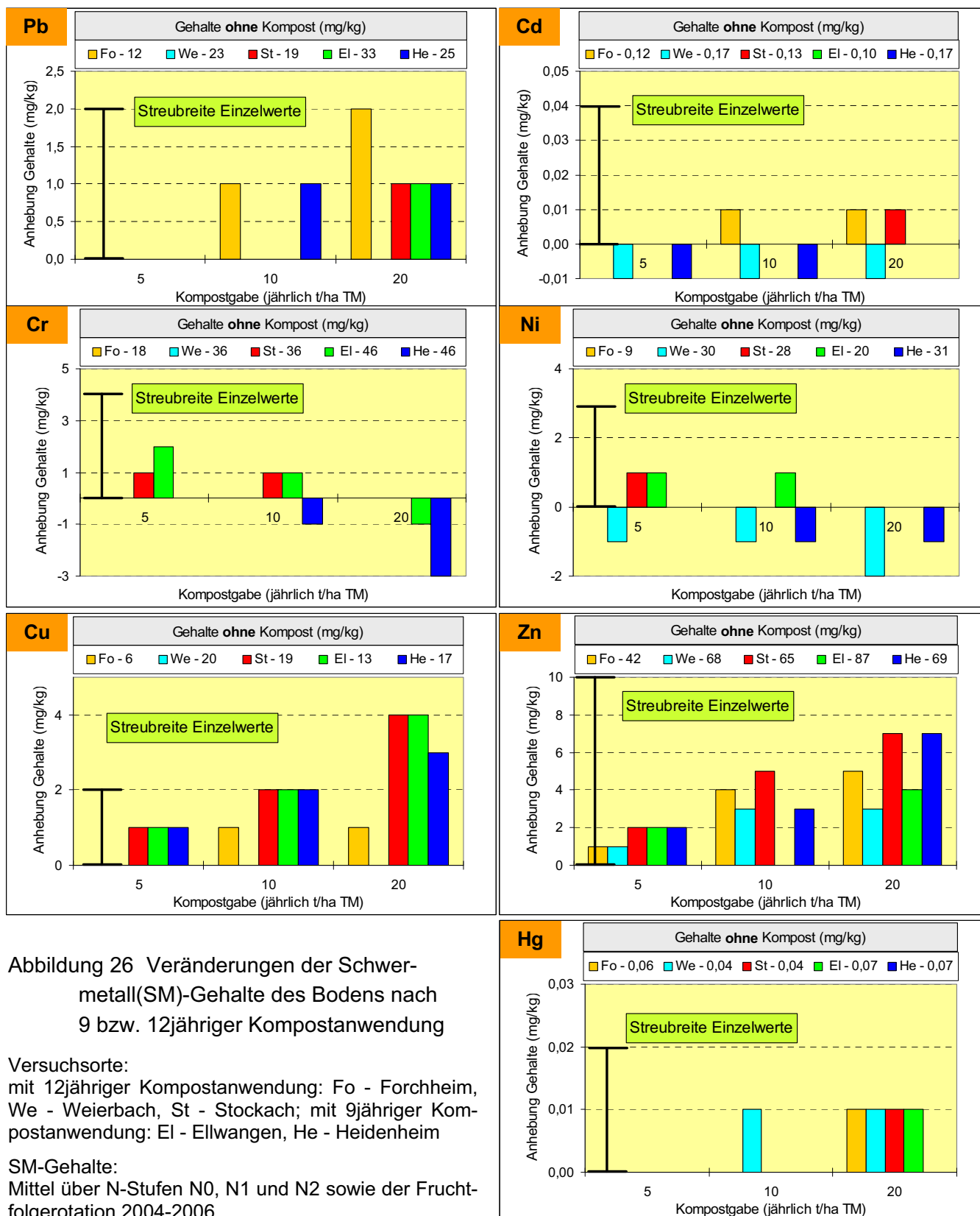


Abbildung 26 Veränderungen der Schwermetall(SM)-Gehalte des Bodens nach 9 bzw. 12jähriger Kompostanwendung

Versuchsorte:
mit 12jähriger Kompostanwendung: Fo - Forchheim, We - Weierbach, St - Stockach; mit 9jähriger Kompostanwendung: El - Ellwangen, He - Heidenheim

SM-Gehalte:
Mittel über N-Stufen N0, N1 und N2 sowie der Fruchtfolgerotation 2004-2006

Kasten Legende über Graphik: *Gehalte absolut* der Varianten ohne Kompost (Stufe K0)
Balken der Graphik: *Anhebungen bzw. Absenkungen* der SM-Gehalte mit steigenden Kompostgaben (5, 10, 20 t/ha TM entspr. Kompoststufen K1, K2, K3)
Strebweite Einzelwerte: mittlere Strebweite der *Einzelwerte aller Versuche*

Lediglich bei Cu und Zn - bei denen mit den Kompostgaben die höchsten Zufuhren unter den Schwermetallen zu verzeichnen sind (vgl. Punkte C 1.2.1.2 und C 2.1.2) - treten im Mittel der Versuche sehr geringe, kaum zu sichernde Anhebungen der SM-Gehalte auf, überwiegend bei den Versuchen mit S.Mais-Fruchtfolge (Stockach, Ellwangen, Heidenheim). Bei Cu bewegen sie sich nach pflanzenbaulich zulässigen Gaben von jährlich 5 bzw. 10 t/ha TM noch im Streubereich der Einzelergebnisse, sind also mit maximal 2 mg/kg noch nicht manifest. Erst bei der überhöhten Kompostgabe (Stufe K3) sind auf den Versuchen mit S.Maisfruchtfolge Gehaltssteigerungen von 3 – 4 mg/kg festzustellen, die man als Anhebung einstufen kann. Bei Zn ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei Cu: Anhebungen der Gehalte um 2 – 4 mg/kg bei den Kompoststufen K1 und K2 und 4 – 7 mg/kg bei der überhöhten Kompostgabe K3, allerdings alle infolge der großen Streubreite noch nicht gesichert.

Die o.g. Ergebnisse und ihre Beurteilung gelten für den Fall, dass *alle* Ernteprodukte (Korn bzw. S.Mais und Stroh) vom Acker abgefahren werden, wie auf den Versuchen generell erfolgt. Um einzuschätzen, ob bei Verbleib des Strohes auf dem Acker eher mit ansteigenden SM-Gehalten des Bodens zu rechnen ist, wurde folgende Hochrechnung durchgeführt:

Die mittleren SM-Entzüge des Strohes der Versuche (vgl. Anlage 1, Tabelle 6-18, Mittel Jahre 2004-2006) wurden für 12 Versuchsjahre summiert. Zugrundegelegt wurden nur die SM-Entzüge der Versuche mit K.Mais-Fruchtfolge (Orte Forchheim und Weierbach), da die entsprechenden Ergebnisse in den Versuchen mit S.Mais deutlich geringer ausfielen (maximal 20 - 30 %) und damit nicht relevant sind. Die Summe der SM-Entzüge wurde zu der analytisch minimal messbaren Anhebung der SM-Bodengehalte und den damit verbundenen Frachten an Schwermetallen im Boden ins Verhältnis gesetzt, um auf diese Weise die Größenordnung möglicher Gehaltsanhebungen bei Verbleib des Strohes auf dem Acker objektiv abzuschätzen.

Tabelle 28 Hochrechnung zum Anteil der SM-Entzüge Stroh (Summe von 12 Jahren) zur möglichen Anhebung der SM-Gehalte im Boden

Nr.	Parameter		Pb	Cd	Cr	Ni	Cu	Zn	Hg
1	Analytisch minimal messbare Anhebung	mg/kg	1,5	0,03	1,5	1,5	2,0	2,5	0,02
2	entspricht SM-Menge im Boden ³⁹	g/ha	5250	105	5250	5250	7000	8750	70
3	SM-Entzug Stroh, <i>Summe</i> von 12 Jahren	g/ha	18	2,6	58	13	85	367	1,0
4	entspricht Anhebung Bodengehalt <i>absolut</i>	mg/kg	0,005	0,001	0,017	0,004	0,02	0,10	0,001
5	<i>relativ</i> zu Zeile Nr. 2	%	<1,0	2,5	1,1	<1,0	1,2	4,2	1,4

Wie Tabelle 28 zeigt, fallen die SM-Entzüge des Strohanteiles im Vergleich zur SM-Menge im Boden, die den analytisch minimal messbaren Gehaltsanhebungen entspricht, so gering aus, dass im Versuchszeitraum von 12 Jahren bei Verbleib des Strohes auf dem Acker praktisch **keine weitere Anhebung der SM-Gesamtgehalte des Bodens** zu verzeichnen gewesen wäre. Maßgebend für eine mögliche Anhebung sind die Zufuhren mit den Kompostgaben (vgl. SM-Frachten in Anhang 1, Tabellen 1-03 bis 5-03). Die SM-Entzüge der Ernteprodukte betragen im Vergleich dazu im Mittel nur <5 % (Pb, Cr, Ni), 5 - 15 % (Cd, Cu, Zn) bzw. maximal 25 % (Hg).

Ergänzend zu den SM-Gesamtgehalten des Bodens sei auf Ergebnisse zu den **mobilen SM-Gehalten des Bodens** verwiesen, über die abschließend im DBU-Projektbericht 2003 (ANONYM 2003A) berichtet worden ist:

Die mobilen Gehalte an Pb und Cr blieben von der Kompostanwendung unbeeinflusst. Die Gehalte an Cd, Ni und Zn gingen mit steigender Kompostgabe sogar erheblich zurück. Der Cu-Gehalt blieb unverändert bzw. stieg in Einzelfällen geringfügig an. Gehalte oberhalb der Hintergrundwerte lt. Bundes-

³⁹ bei einem mittleren Bodengewicht des Ackerhorizontes (0 - 25 cm) von 3.500 t/ha

Bodenschutz-Verordnung wurden in den Versuchen nicht festgestellt. Als Ursache für die erhebliche Absenkung der mobilen Gehalte an Cd, Ni und Zn kommen die allmähliche pH-Anhebung nach Kompostgaben, durch die die Sorption an der Bodenoberfläche zunimmt, sowie die verstärkte Bildung metallorganischer Komplexverbindungen infrage, die an der durch die Zufuhr organischer Substanz noch vergrößerten Bodenoberfläche sorptiv gebunden werden können. Insgesamt ist unter den Bedingungen „guter fachlicher Praxis“, d.h. bei moderaten Kompostgaben und Gewährleistung optimaler pH-Werte des Bodens, nicht mit nachteiligen Veränderungen des mobilen Schwermetallpools im Boden zu rechnen.

Zusammenfassend belegen die Ergebnisse der Bodenuntersuchung, dass die Schwermetallfrachten, die mit den regelmäßigen Kompostgaben in den Boden eingebracht worden sind, auch nach 9 Jahren (Versuche Ellwangen und Heidenheim) bzw. 12 Jahren (Versuche Forchheim, Weierbach und Stockach) noch keine merkliche Anhebung der SM-Gesamtgehalte des Bodens bewirkt haben. Geringe, kaum zu sichernde Tendenzen zu Anhebungen bei Cu und Zn sind angesichts der Doppelfunktion dieser Schwermetalle als gleichzeitige essenzielle Spurenelemente für die Pflanzenernährung nicht problematisch. Auch eine erhöhte Mobilisierung der SM-Anteile im Boden ist nicht zu erwarten. Bei pflanzenbaulich relevanten Kompostgaben von 20 - 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus ist demnach das Risiko einer unerwünschten Schwermetall-Kontamination des Bodens, trotz der Tatsache, dass wegen der geringen Entzüge der Ernteprodukte zweifellos im Boden allmählich ein Positivsaldo aufgebaut wird, zum Glück sehr gering und damit kalkulierbar und beherrschbar. Geringe Anhebungen der Bodengehalte sind - wenn überhaupt, dann vorrangig bei Cu und Zn - nur in größeren Zeiträumen von 10 - 20 Jahren wahrscheinlich⁴⁰.

Das mindert nicht die Bedeutung eines wirksamen Bodenschutzes und der Bemühungen um möglichst niedrige Schwermetallbelastungen bei der Kompostanwendung. Dazu sollte durch Bodenuntersuchungen in großen Abständen überprüft und bei Bedarf durch entsprechende Maßnahmen gewährleistet werden, dass sich der Schwermetallstatus des Bodens durch Zufuhr von Kompost - wie auch anderer Dünger und Materialien mit relevanten Gehalten an Schwermetallen - nicht verschlechtert. Als zusätzliche Sicherungsmaßnahme sollten Komposte nur auf Böden eingesetzt werden, die die Vorsorgewerte lt. Bundes-Bodenschutz-Verordnung sicher unterschreiten. Im Einzelfall kann es aber auch bei Bodengehalten oberhalb der Vorsorgewerte (z.B. bei geogen erhöhten Gehalten) sinnvoll sein, Komposte zur Erreichung von bestimmten Zielen (z.B. Bodenverbesserung) einzusetzen, wenn die bereits im Boden bestehenden Gehalte dadurch nicht erhöht werden. In der Regel ist dafür die Zustimmung der zuständigen Behörde erforderlich.

Abschließend ist es anhand der langjährig gewonnenen Versuchsergebnisse objektiv möglich, das Risiko der Schwermetallbelastung durch Kompostgaben als nachrangig einzustufen. Bemühungen um eine Verschärfung entsprechender Bodenschutzmaßnahmen (vgl. Standpunkt

⁴⁰ Rechnerische Anreicherungsprognosen für Schwermetalle im Boden über mehrere Jahrzehnte sind zudem aus folgenden Gründen nur sehr eingeschränkt realistisch:

Bei regelmäßiger Anwendung von Komposten in großen Zeiträumen (Jahrzehnte) können empfohlene Aufwandmengen von jährlich 7 - 10 t/ha TM nur für eine begrenzte Zeitdauer ausgebracht werden, weil es sonst zu einer Überversorgung des Bodens an organischer Substanz kommen würde. Später müssen die Kompostgaben nach der „guten fachlichen Praxis“ an den Bedarf für die einfache Humusreproduktion und damit auf deutlich weniger als 50 % der empfohlenen Kompostgaben zurückgefahren werden. Die Zufuhr an Schwermetallen und damit das mögliche Risiko von Schwermetallanreicherungen im Boden geht vor diesem Hintergrund nochmals deutlich zurück.

des Umweltbundesamtes „Gleiches zu Gleichem“, ANONYM 2005) sind nach der vorliegenden Datenlage nicht zielführend.

C 2.2.1.8 Gehalte an organischen Schadstoffen

Ähnlich wie bei den Schwermetallen boten die Kompost-Anwendungsversuche eine hervorragende Möglichkeit, nach einer Versuchsdauer von 9 bzw. 12 Jahren eine zwar kaum wahrscheinliche, aber mögliche Kontamination der Böden mit organischen Schadstoffen nach langjährigem Komposteinsatz quantitativ zu prüfen.

Dazu wurden nach Abschluss der Versuche Proben aus der Bodenschicht 0 - 25 cm der Versuchsvarianten 3 (Kontrolle), 9 (jährlich 10 t/ha TM Kompost) und 12 (jährlich 20 t/ha TM Kompost) auf alle derzeit für den Bodenschutz als relevant diskutierten organischen Schadstoffe (Polychlorierte Biphenyle - PCB, Polychlorierte Dioxine und Furane - PCDD/F, Organochlorpestizide, Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe - PAK, Phthalate, Organo-Zinn-Verbindungen, Chlorphenole, Nonylphenole, Bisphenol A, Moschusverbindungen) untersucht, um mögliche Einflüsse der langjährigen Kompostgaben zu erfassen. Die eingesetzten Komposte waren jährlich auf PCB und PCDD/F untersucht worden. Nach Punkt C 1.2.2 bewegten sich die Gehalte durchweg auf einem sehr niedrigen Niveau.

Eine komprimierte Darstellung der umfangreichen Untersuchungsergebnisse (Einzeldaten vgl. Anhang 1, Tabellen 1-08 bis 5-08, jeweils Punkt 2) zeigt Tabelle 29. Anhand dieser Übersichtsmatrix konnte - angesichts der Vielzahl der untersuchten Einzelverbindungen der organischen Stoffgruppen und auch der noch lückenhaften Vergleichsdaten über Referenzwerte unbelasteter Böden (herangezogen wurden aktuelle Projektergebnisse aus ANONYM 2003B und ANONYM 2005) - allerdings nur eine grundsätzliche allgemeine Beurteilung vorgenommen werden, von der Einzelfälle durchaus abweichen können.

Die **Ergebnisse** und ihre Bewertung:

Die Gehalte der untersuchten organischen Stoffgruppen im Boden bewegen sich nach Versuchsende, d.h. nach 9 bzw. 12jähriger Kompostanwendung, auf einem allgemein sehr niedrigen Gehaltsniveau ($\mu\text{g/kg TM}$), überwiegend im Bereich oder kurz oberhalb der analytischen Nachweisgrenze (Kennzeichnung grün bzw. hellblau in Tabelle 29). Soweit Referenzwerte für unbelastete Böden bekannt sind, trifft das auch für gering höhere Gehalte an PAK und vereinzelt an PCDD/F (Forchheim und Weierbach) zu (Kennzeichnung blau in Tabelle 29). Einzelne Abweichungen (in den Feldern von Tabelle 29 mit Buchstaben A - F dokumentiert, siehe Anmerkungen) erwiesen sich dabei als nicht typische Ausnahmen bzw. auch als mögliche Analysefehler. Durchweg - und das ist die entscheidende Aussage der umfangreichen Recherche - war **kein Einfluss der langjährigen Kompostanwendung** zu erkennen, auch nicht durch sehr hohe Gaben von jährlich 20 t/ha TM.

Zusammenfassend ergeben sich aus den Kompost-Anwendungsversuchen keine Hinweise, dass eine regelmäßige Kompostanwendung zur Anreicherung von organischen Schadstoffen im Boden führt. Ein entsprechendes Risiko besteht nach der vorliegenden umfangreichen Datenlage nicht.

C Ergebnisse

C 2 Kompostwirkungen in den Anwendungsversuchen

C 2.2 Wirkungen auf den Boden

Tabelle 29 Organische Schadstoffgehalte in Böden der Versuchsstandorte nach 9 bzw. 12jähriger Kompostanwendung
Komprimierte Ergebnisdarstellung und -beurteilung (Einzeldaten vgl. Anhang 1, Tabellen 1-08 bis 5-08, jeweils Punkt 2)

Parameter	Einzelverb. Anzahl	Dimension TM	Versuchsstandort					Nachweis- grenze	Ref.werte Böden
			Forchheim	Weierbach	Stockach	Ellwangen	Heidenheim		
Polychlorierte Biphenyle (PCB)	6 Kongenere	µg/kg						1	3 - 7
Polychl. Dioxine u. Furane (PCDD/F)	-	ng I-TEQ/kg						1	1 - 4
Organochlorpestizide	29	µg/kg	A		B			1	-
Polyz. Aromat. Kohlenwasserstoffe (PAK)	20	µg/kg			C	C	C	1	300 - 600*
davon Benzo(a)pyren		µg/kg			C		C	1	20 - 40
Phthalate	10	µg/kg			E		D	10	50 - 100
Organo-Zinn-Verbindungen	10	µg/kg						0,1	-
Chlorphenole	27	µg/kg						0,1	-
Nonylphenole	3	µg/kg	F					0,1 - 1	-
Moschusverbindungen	2	µg/kg						0,1 - 0,2	0,2 - 1,5
Bisphenol A	1	µg/kg						0,5	-

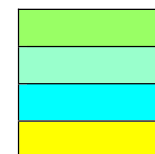
Legende: Analysenwerte zeigen

a) keine Unterschiede ohne bzw. mit Kompost und < bzw. im Bereich Nachweisgrenze

im Bereich und kurz oberhalb Nachweisgrenze

< bzw. im Bereich Referenzwerte

b) erhöhte Werte mit Kompost



Anmerkungen:

A alle Verbindungen außer DDT-Werte gering erhöht, keine Unterschiede ohne/ mit Kompost und außer p'p-DDE-Werte um 33 µg/kg TM (mit Kompost) sowie 4 µg/kg TM (ohne Kompost)

* Summenwerte nach EPA

B alle Verbindungen außer p'p-DDE-Werte um 6 -8 µg/kg TM, keine Unterschiede ohne/ mit Kompost

C vereinzelt gering ansteigende Gehalte mit Kompostgabe (Fluoranthren, Pyren, Benzo(e)pyren), allgemein auf sehr niedrigem Niveau

D mit Ausnahme von Bis-(2-ethylhexyl)-Phthalat: bei 30 t/ha TM Kompost deutlich erhöht (Analysenfehler ?)

E mit Ausnahme von Bis-methoxyethyl-Phthalat: erhöhte Werte um 100 - 400 µg/kg TM nach Kompostanwendung

F mit Ausnahme eines gering erhöhten Wertes von 4-Nonylphenol bei Kompostgabe von 30 t/ha TM

C 2.2.1.9 Bodendaten des Bodenprofils nach Versuchsende

Ein wesentliches Anliegen des Forschungsprojektes war es, neben den Kompostwirkungen auf die Ackerkrume (vgl. Punkte C 2.2.1 und C 2.2.2) auch mögliche Einflüsse der langjährigen Kompostanwendung auf das Bodenprofil zu erfassen, vor allem mögliche Risiken für die Bodenfruchtbarkeit rechtzeitig zu erkennen.

Dazu wurden nach Versuchsende auf allen Versuchsstandorten (Standorte Forchheim, Weierbach und Stockach - nach 12 Jahren, Standorte Ellwangen und Heidenheim - nach 9 Jahren) Mischproben aller Versuchsvarianten 1 - 12 aus drei Tiefen (0 - 30, 30 - 60 und 60- 90 cm) entnommen und auf Merkmale der Bodenfruchtbarkeit sowie die Schwermetallgehalte des Bodens untersucht. Die Ergebnisse wurden mit den Resultaten verglichen, die zur Versuchsanlage vor der Kompostanwendung gewonnen worden waren.

Merkmale der Bodenfruchtbarkeit

Eine komprimierte Übersicht zur Bewertung der Ergebnisse der Fruchtbarkeitsmerkmale des Bodens (pH-Wert, Humusgehalt, N-Gesamtgehalt, lösliche Gehalte an Phosphor, Kalium und Magnesium) gibt Tabelle 30. (Einzelergebnisse der Standorte vgl. Anhang 1, Tabellen 1-08 bis 5-08, jeweils Punkte 1.1.1 und 1.2.1). Abbildung 27 zeigt beispielhaft die Ergebnisse des Versuches Stockach.

Ergebnisse und Bewertung:

Die komprimierten Bewertungen lt. Tabelle 30 erfolgen stets unter Berücksichtigung der Streuung der Mittelwerte, in Abbildung 27 beispielhaft als Standardabweichung $\pm s$ zu Versuchsbeginn, im übrigen anhand von erprobten Analysenschwankungen der einzelnen Parameter. Die Bewertung „keine Unterschiede“ kann deshalb auch erfolgen, wenn die Daten der Versuchsvarianten geringe Abweichungen aufweisen. Bei den Versuchen Ellwangen und Heidenheim war nur ein Vergleich der Bodenschichten 0 - 30 und 30 - 60 cm möglich, da die Schicht 60 - 90 cm zu Versuchsbeginn aus technischen Gründen nicht beprobt werden konnte.

Der **pH-Wert** der obersten Bodenschicht 0 - 30 cm ging - analog zu den Ergebnissen unter Punkt C 2.2.1.1 - ohne Kompostanwendung im Vergleich zur Ausgangssituation (Versuchsanlage) in den Versuchen überwiegend zurück (außer Weierbach und Heidenheim⁴¹), besonders deutlich in Forchheim und Stockach. Diese pH-Absenkung setzte sich bis in die Bodenschicht 30 - 60 cm, in der Tendenz auch bis auf 60 - 90 cm fort. Die pH-Absenkung konnte durch Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM in allen Bodenschichten überwiegend kompensiert werden. Die überhöhte Kompostgabe von jährlich 20 t/ha TM hat in der obersten Bodenschicht vermehrt zu pH-Anhebungen geführt, die in Forchheim (leichter Boden) und Ellwangen (schwerer Boden) bis in tiefere Schichten gewirkt haben. **Insgesamt** wird deutlich, dass der pH-Wert in der Ackerkrume durch die Kalkzufuhr der Kompostgaben durchweg stabilisiert wird und sie auch in tieferen Schichten der pH-Absenkung entgegenwirken kann.

Die deutliche Wirkung der Kompostgaben auf den **Humusgehalt** der Ackerkrume (vgl. auch Punkt C 2.2.1.2) setzte sich in tieferen Bodenschichten nur abgeschwächt fort. In 30 - 60 cm Tiefe konnte der Humusgehalt gehalten (z.B. Weierbach, Stockach, Ellwangen) bzw. sogar - überwiegend bei sehr hohen Gaben - noch angehoben werden (Forchheim, Ellwangen). In der

⁴¹ Gründe: hohe (Heidenheim) bis sehr hohe (Weierbach) Ausgangs-pH-Werte, verbunden mit hohen Kalkreserven, die eine pH-Absenkung verhinderten.

tieftsten Bodenschicht waren kaum Veränderungen festzustellen. **Insgesamt** zeigte sich, dass sich die hohe Zufuhr an organischer Substanz mit den Kompostgaben vorwiegend auf den Humusgehalt der Ackerkrume positiv auswirkt und vereinzelt - vorrangig sicher auf sehr leichten Böden - auch in der Schicht 30 - 60 cm zu Anhebungen beitragen kann.

Auch die Rückgänge des **N-Gesamtgehaltes** in der Ackerkrume im Vergleich zu Versuchsbeginn wurden durch Kompostgaben zumindest vermindert (Weierbach, Stockach) bzw. kompensiert oder leicht angehoben (Forchheim, Ellwangen, Heidenheim). In der Schicht 30 - 60 cm

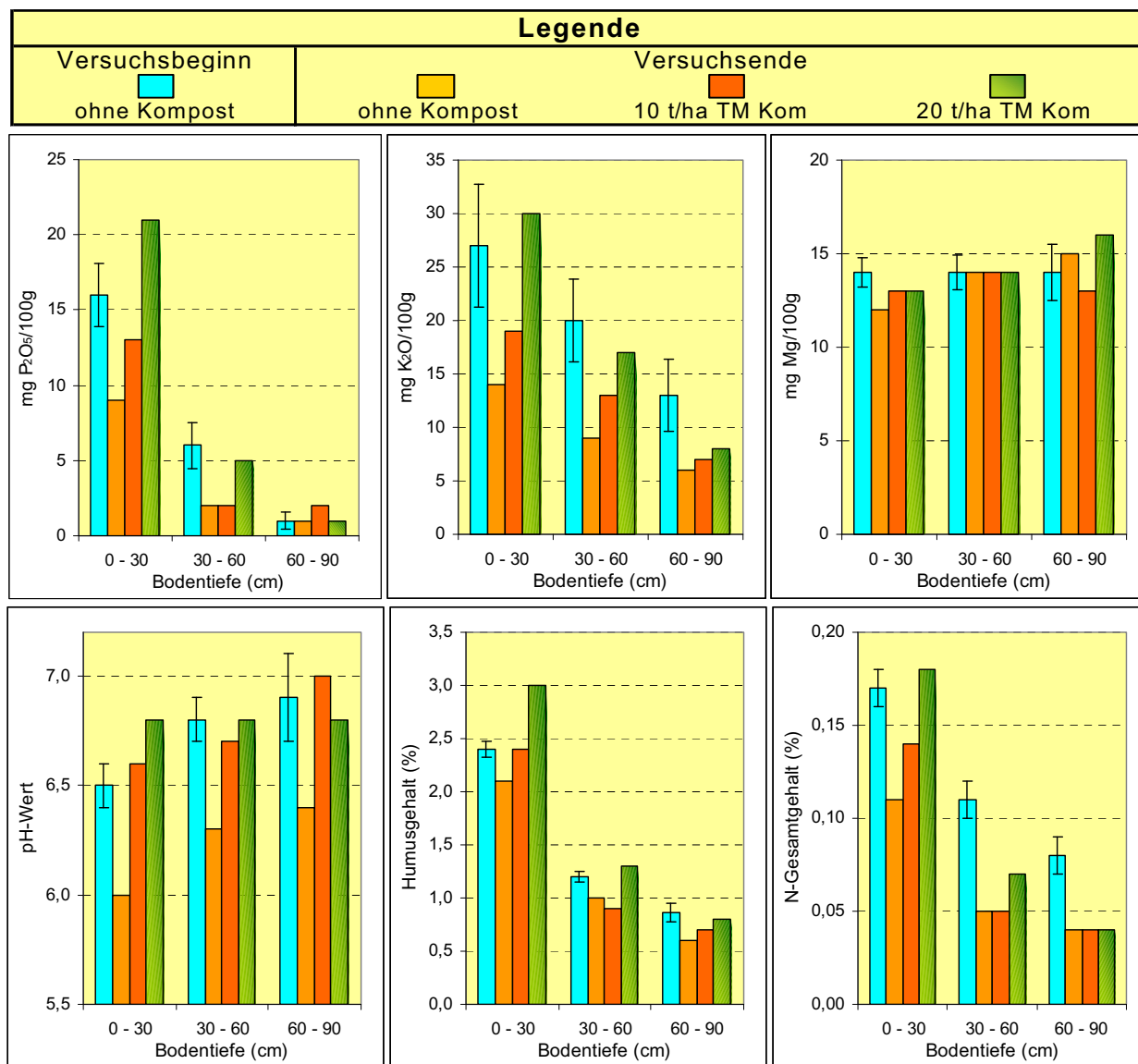


Abbildung 27 Vergleich der Fruchtbarkeitsmerkmale im Bodenprofil zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende am Beispielsversuch Stockach: pH-Wert, Humusgehalt, N-Gesamtgehalt und pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte (Phosphor, Kalium, Magnesium) des Bodens

Versuchsbeginn: Mittelwerte der Versuchsfläche mit Streubreite $\pm s$

Versuchsende: Varianten mit voller N-Gabe (N2), V3 - ohne Kompost (Kontrolle), V9 - 10 t/ha TM Kompost, V12 - 20 t/ha TM Kompost

Tabelle 30 Vergleich der Fruchtbarkeitsmerkmale im Bodenprofil zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende:

pH-Wert, Humusgehalt, N-Gesamtgehalt und lösliche Nährstoffgehalte (Phosphor, Kalium, Magnesium).

Versuchs-ort	Boden-tiefe (cm)	Kompost-gabe (t/ha TM)	Bodenparameter					
			pH-Wert	Humus-gehalt	N-Gesamt-gehalt	Lösliche Nährstoffgehalte		
						Phosphor	Kalium	Magnes.
Forchheim	0 - 30	ohne	--	0	-	--	--	0
		10	0	++	0	-	--	0
		20	++	++	0	0	--	0
	30 - 60	ohne	--	0	--	-	--	0
		10	0	++	+	+	--	0
		20	++	++	+	++	-	0
	60 - 90	ohne	-	0	--	0	0	0
		10	0	0	--	0	0	0
		20	++	0	--	+	0	0
Weierbach	0 - 30	ohne	0	0	--	0	--	0
		10	0	++	-	0	0	0
		20	0	++	-	++	++	0
	30 - 60	ohne	0	0	--	+	0	0
		10	0	0	--	+	0	0
		20	0	0	--	+	0	0
	60 - 90	ohne	0	0	--	+	-	0
		10	0	0	--	+	-	0
		20	-	+	--	+	-	0
Stockach	0 - 30	ohne	--	--	--	--	--	-
		10	0	0	-	-	-	0
		20	++	++	0	++	+	0
	30 - 60	ohne	--	-	--	--	--	0
		10	0	-	--	--	--	0
		20	0	0	--	0	0	0
	60 - 90	ohne	--	--	--	0	--	0
		10	0	-	--	0	--	0
		20	0	0	--	0	--	0
Ellwangen ¹	0 - 30	ohne	-	0	0	-	--	-
		10	++	++	++	0	0	-
		20	++	++	++	0	0	0
	30 - 60	ohne	-	-	0	0	--	0
		10	-	0	0	0	-	0
		20	++	++	++	0	0	0
Heidenheim ¹	0 - 30	ohne	0	--	--	--	--	0
		10	0	0	0	--	--	0
		20	0	++	++	0	0	+
	30 - 60	ohne	++	--	--	--	--	0
		10	+	-	-	--	--	0
		20	++	0	0	-	--	+

Legende: Untersuchungsergebnisse zeigen im Vergleich zu Ergebnissen vor Versuchsbeginn

- a) keine Unterschiede 0
- b) Unterschiede:
- Tendenz zur Anhebung +
 - Absenkung -
 - deutliche Anhebung ++
 - Absenkung --

Vergleich der Varianten bei voller N-Gabe (N2):

V3 - ohne Kompost, V9 bzw. V12 -10 bzw. 20 t/ha TM Kompost

¹ Vergleich der Schicht 60 - 90 cm nicht möglich, da vor Versuchsbeginn nicht beprobt

waren nur geringe positive Wirkungen festzustellen (Forchheim, Ellwangen, Heidenheim)⁴².

Insgesamt war damit, ähnlich wie beim Humusgehalt, nur eine mäßige Wirkung der Kompostgaben auf den N-Gesamtgehalt in tieferen Bodenschichten festzustellen.

Der deutliche Rückgang der **Gehalte an löslichem Phosphor und Kalium** in der Ackerkrume der Kontrollvariante ohne Kompost (vgl. Punkt C 2.2.1.6) konnte bei Phosphor durch Kompostgaben von 10 t/ha TM zumindest abgeschwächt (Forchheim, Stockach) bzw. kompensiert (Ellwangen), durch höhere Gaben von 20 t/ha TM abgeschwächt (Heidenheim), kompensiert (Forchheim, Ellwangen) bzw. sogar in eine Anhebung umgewandelt werden (Weierbach, Stockach). Auch in der Schicht 30 - 60 cm war überwiegend eine ähnlich positive Wirkung festzustellen. Die Schicht 60 - 90 cm blieb dagegen meist unbeeinflusst. Bei Kalium zeigten sich diese Effekte, bedingt durch die deutlich höhere Auswaschung, in den Schichten 0 - 30 cm und 30 - 60 cm meist schwächer⁴³. In der unteren Schicht 60 - 90 cm war durchweg kein Komposteinfluss festzustellen. Die Magnesiumversorgung der Böden wurde in den einzelnen Schichten, im Einklang mit den geringen Unterschieden in der Ackerkrume lt. Punkt C 2.2.1.6, durch die Kompostgaben fast durchweg nicht beeinflusst.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die regelmäßigen Kompostgaben auf die erfassten Fruchtbarkeitsmerkmale im Bodenprofil - sofern überhaupt - positiv wirkten. Das trifft für den pH-Wert und abgeschwächt für den Humusgehalt und den N-Gesamtgehalt zu, die in der Ackerkrume durchweg gleiche oder sogar höhere Gehalte als zu Versuchsbeginn zeigten. Während die Kalkwirkung der Kompostgaben auch in tieferen Schichten nachweisbar war, traf das für den Humusgehalt nur eingeschränkt zu, während beim N-Gesamtgehalt keine Wirkung zu beobachten war. Die deutliche Förderung der Gehalte an löslichem Phosphor in der Ackerkrume setzte sich abgeschwächt auch in der Schicht 30 - 60 cm fort, in der Schicht 60 - 90 cm war ein Komposteinfluss kaum mehr feststellbar. Bei Kalium treffen diese Aussagen nur stark abgeschwächt zu, d.h. in tieferen Bodenschichten war keine merkliche Kompostwirkung zu beobachten. Insgesamt ergibt sich damit als wesentliche Aussage für den nachhaltigen Bodenschutz, dass bei einer *pflanzenbaulich angemessenen Kompostanwendung*, d.h. bei Gaben von 20 - 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus, keine Risiken für eine Minderung der Bodenfruchtbarkeit bzw. für den Boden- und Gewässerschutz, z.B. durch unerwünschte Ein- und Auswaschung von Nährstoffen in tiefere Bodenschichten bzw. in das Grundwasser, bestehen.

Schwermetallgehalte des Bodens

Eine komprimierte Übersicht zur Bewertung der Gesamtgehalte maßgebender Schwermetalle (Blei - Pb, Cadmium - Cd, Chrom - Cr, Nickel - Ni, Kupfer - Cu, Zink - Zn, Quecksilber - Hg) im Bodenprofil nach Versuchsende gibt Tabelle 31 (Einzelergebnisse der Standorte vgl. Anhang 1, Tabellen 1-08 bis 5-08, jeweils Punkt 1.2.2). Abbildung 28 zeigt dazu beispielhaft die Ergebnisse des Versuches Stockach.

⁴² Versuche Forchheim, Weierbach und Stockach: Durchweg geringere Gehalte in tieferen Bodenschichten im Vergleich zu Versuchsbeginn (Forchheim nur 60 - 90 cm) sind auf Grund des sehr niedrigen Gehaltsniveaus nahe der Bestimmungsgrenze der Messmethode nicht belastbar und werden deshalb nicht kommentiert.

⁴³ Eine gewisse Diskrepanz der Ergebnisse der Schicht 0 - 30 cm zu den Ergebnissen der Krumenuntersuchung lt. Punkt C 2.2.1.6, in denen eine deutlichere Anhebung der Kaliumgehalt nach Kompostanwendung festzustellen war, erklärt sich aus der unterschiedlichen Probenahme, die bei der Krumenuntersuchung nur in 0 - 25 cm Bodentiefe durchgeführt wurde.

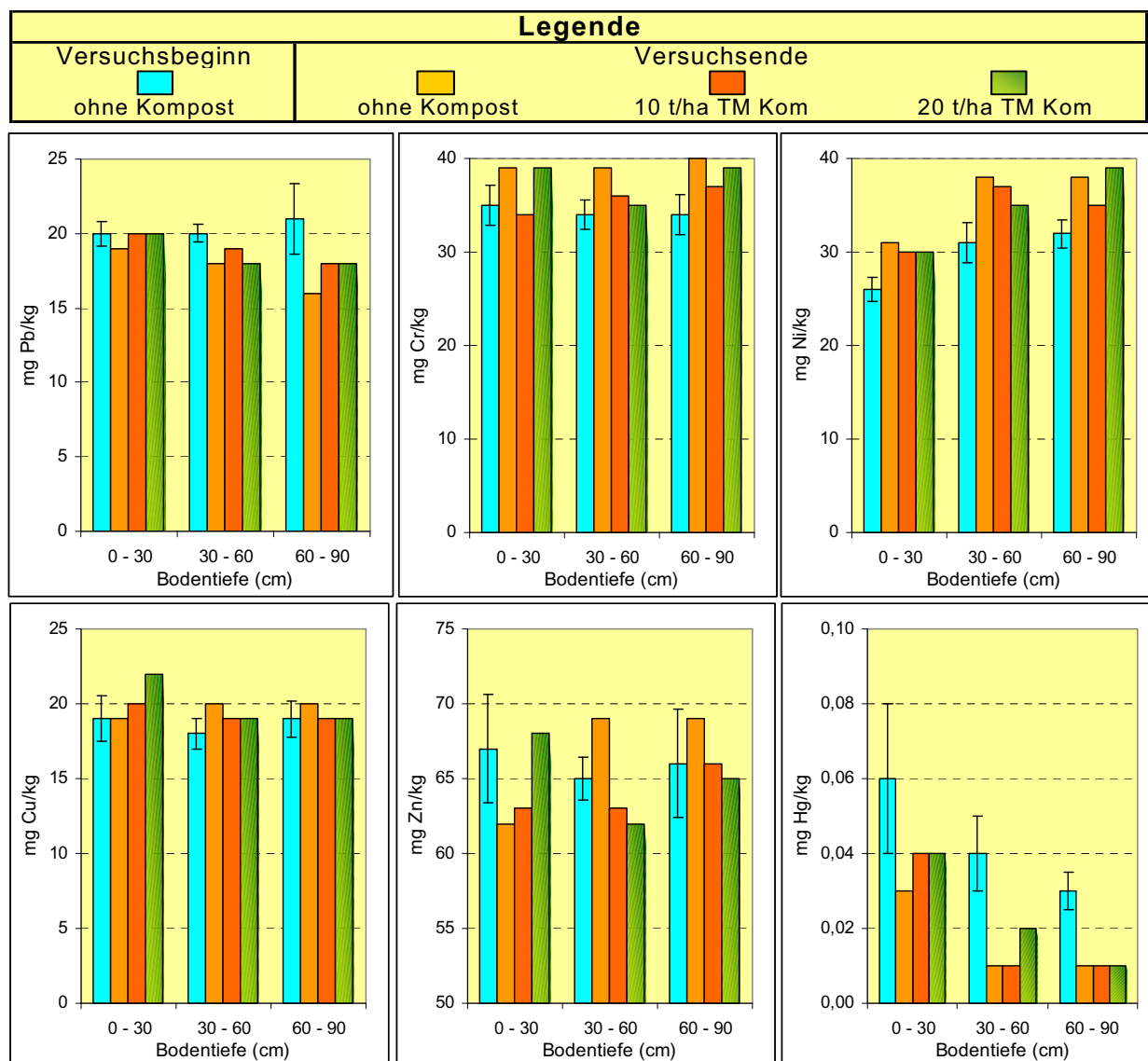


Abbildung 28 Vergleich der Bodendaten im Bodenprofil zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende am Beispielsversuch Stockach: Schwermetallgehalte des Bodens (außer Cd).

Details zur Legende vgl. Abbildung 27

Cd-Gehalte zu Versuchsbeginn und Versuchsende durchweg $< 0,10$ mg/kg, deshalb nicht dargestellt

Im Unterschied zur Bewertung der Fruchtbarkeitsmerkmale im Bodenprofil wurden in Tabelle 31 die Ergebnisse der praxisrelevanten langjährigen Kontrollvariante ohne Kompost (V3) nach Versuchsende mit den Kompostvarianten jährlich 10 bzw. 20 t/ha TM (V9 bzw. V12), alle bei gleichzeitiger voller N-Ergänzungsdüngung (N2), verglichen. Begründung: Zwischen den Schwermetallgehalten zu Versuchsbeginn und den Gehalten der Kontrollvariante nach Versuchsabschluss bestanden unter Berücksichtigung der Streuung der Gehalte durch Probenahme und Analyse keine signifikanten Unterschiede.

Ergebnisse und Bewertung:

Im Gesamtüberblick zeigt Tabelle 31, dass sich die Schwermetallgehalte im Bodenprofil nach Kompostanwendung überwiegend nicht verändert haben. Wenn überhaupt, dann sind nur Ten-

Tabelle 31 Schwermetallgehalte im Bodenprofil am Versuchsende nach regelmäßigen Kompostgaben (jährlich 10 bzw. 20 t/ha TM) im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost

Vergleich der Varianten bei voller N-Gabe (N2):
V3 - ohne Kompost, V9 bzw. V12 - 10 bzw. 20 t/ha TM Kompost

Versuchs-ort	Boden-tiefe (cm)	Kompost-gabe (t/ha TM)	Schwermetalle						
			Blei	Cad-mium	Chrom	Nickel	Kupfer	Zink	Queck-silber
Forch-heim	0 - 30	10						+	
		20							
	30 - 60	10						+	
		20							
	60 - 90	10			+			+	
		20			+			-	
Weier-bach	0 - 30	10							
		20							
	30 - 60	10							
		20							
	60 - 90	10							
		20	+						
Stockach	0 - 30	10			-				
		20					+	+	
	30 - 60	10			-			-	
		20			-			-	
	60 - 90	10			-			-	
		20						-	
Ellwan-gen	0 - 30	10			-				
		20				+		+	
	30 - 60	10				+			-
		20	+		-				-
	60 - 90	10							
		20			-				+
Heiden-heim	0 - 30	10		+				+	
		20					+	+	
	30 - 60	10							
		20			-				
	60 - 90	10			+				-
		20			-				

Legende: Untersuchungsergebnisse zeigen im Vergleich zu Kontrollvariante **ohne Kompost** (V3)

a) keine Unterschiede

b) Unterschiede:

- Tendenz zur Anhebung
- Absenkung
- messbare Anhebung
- messbare Absenkung

+
-
+
-

denzen festzustellen, wobei sich die geringen Anhebungen mit geringen Absenkungen der Ge-halte etwa die Waage halten.

In der oberen Bodenschicht 0 - 30 cm spiegeln sich weitgehend die Ergebnisse wider, die bei der Bewertung der Krumenproben festgestellt worden waren (vgl. Punkt C 2.2.1.7):

Überwiegend keine Veränderung der Schwermetallgehalte bei pflanzenbaulich zulässigen Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM⁴⁴, bei hohen Gaben von jährlich 20 t/ha TM in der Tendenz geringe Anhebungen bei Cu und Zn (Stockach, Ellwangen, Heidenheim).

Ähnlich sind auch die Gehalte in den tieferen Bodenschichten 30 - 60 bzw. 60 - 90 cm zu bewerten:

Keine messbare Veränderung der Schwermetallgehalte, vereinzelte Tendenzen zu geringen Anhebungen, aber auch Absenkungen zeigen keine ursächlichen Zusammenhänge mit der Kompostanwendung.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die langjährige Kompostanwendung in den Versuchen keine messbare Anhebung der Schwermetallgehalte im Bodenprofil bewirkt hat, weder in der Ackerkrume, noch in den tieferen Bodenschichten. Diese Beurteilung trifft auch für überhöhte Kompostgaben von jährlich 20 t/ha TM zu, die in der landwirtschaftlichen Praxis unzulässig sind. Unter Berücksichtigung dieser Sicherheitsreserve kann die Beurteilung lt. Punkt C 2.2.1.7 erhärtet werden, dass das Risiko einer unerwünschten Schwermetall-Kontamination des Bodens durch regelmäßige Kompostgaben in pflanzenbaulich zulässiger Höhe objektiv gering und kalkulierbar ist. Geringe Anhebungen der Bodengehalte sind in der Ackerkrume - wenn überhaupt, dann bei Cu und Zn - nur in größeren Zeiträumen von 10 - 20 Jahren wahrscheinlich. In den tieferen Bodenschichten sind solche Anhebungen praktisch ausgeschlossen. Trotzdem sollten im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes Komposte mit möglichst niedrigen Schwermetallgehalten eingesetzt werden, um den unvermeidlichen Positivsaldo an Schwermetallen möglichst gering zu halten. Zusätzlich sollte durch Bodenuntersuchungen gewährleistet werden, dass sich der Schwermetallstatus des Bodens mittel- und langfristig nicht verschlechtert.

C 2.2.2 Bodenphysikalische und -biologische Wirkungen

Ein wichtiges Anliegen des Abschlussprojektes war es, die bodenphysikalischen und -biologischen Wirkungen der regelmäßigen Kompostgaben nach Beendigung der Feldversuche abschließend zu bewerten. Dazu wurden an den Versuchsstandorten Forchheim und Stockach (12 Versuchsjahre) und Heidenheim (9 Versuchsjahre) jeweils Bodenproben der Varianten 3 - ohne Kompost (K0), 9 - jährlich 10 t/ha TM Kompost (K2) entsprechend der maximal möglichen Regelgabe und 12 - jährlich 20 t/ha TM Kompost (K3) als Höchstgabe für Versuchszwecke, alle Varianten bei optimaler N-Düngung (N2), untersucht. In die Ergebnisbewertung wurden auch die Resultate der umfassenden Beurteilungen zum Abschluss des DBU-Projektes im Jahre 2002 (ANONYM 2003A) einbezogen.

⁴⁴ Vereinzelt geringe Absenkungen der Cr-Gehalte, auch in tieferen Schichten, verdeutlichen - wie auch ähnliche Tendenzen bei Zn und Hg - die Streubreite der Ergebnisse. Sie sind nicht auf die Wirkung der Kompostgaben zurückzuführen.

C 2.2.2.1 Bodenphysikalische Wirkungen

Alle Untersuchungen der ausgewählten Parameter erfolgten nach den Methoden gemäß Punkt B 3.3.2, Tabelle 16, dabei überwiegend an ungestörten, feldfeuchten Stechzylinderproben, mit Ausnahme der Aggregatstabilität und der Wasserkapazität, die an lufttrockenem, homogenisiertem Material <2 mm von Mischproben ermittelt wurden. Zu den Einzelergebnissen und ihrer ausführlichen Bewertung vgl. Anhang 2, Teil 2.

C 2.2.2.1.1 Auswirkungen auf die Bodenstruktur

Die **Trockenrohdichte** des Bodens (in der Praxis häufig als Lagerungsdichte bezeichnet) ging an den Standorten Forchheim und Stockach mit steigenden Kompostgaben deutlich und signifikant zurück (vgl. Abbildung 29 oben). Damit verstärkte sich die Kompostwirkung auf diesen Bodenparameter, die im Jahre 2002, d.h. zum Abschluss des DBU-Projektes, erst als Tendenz zu verzeichnen war. Der Komposteinsatz bewirkte hier also eine Lockerung des Bodens, d.h. eine Erniedrigung des Anteils an Festmaterial je Volumeneinheit Boden. Am Standort Heidenheim war dagegen - wie auch schon im Jahre 2002 - kein Komposteinfluss auf die Trockenrohdichte zu verzeichnen. Ursache dafür war, dass der Boden der Kontrollvariante ohne Kompost schon sehr locker lagerte, so dass durch Kompostgaben keine weitere Verbesserung möglich war.

Der (gesamte) **Porenanteil** des Bodens verhält sich reziprok zur Trockenrohdichte. Deshalb fällt er am Standort Heidenheim mit durchweg über 50 % am höchsten aus, gefolgt von Stockach und Forchheim. Die Kompostgaben führten an den beiden letztgenannten Standorten zu hoch signifikanten Anhebungen des Porenanteils gegenüber der unbehandelten Kontrollvariante (vgl. Abbildung 29 Mitte) und setzen damit den schon 2002 beobachteten Trend weiter fort. Auf dem leichten Boden in Forchheim betrug die Erhöhung absolut 2,2 bzw. 3,1 % bei jährlich 10 bzw. 20 t/ha Kompost, auf dem mittleren Boden in Stockach sogar 4,4 bzw. 5,4 %. Das Ausbleiben der Kompostwirkung am Standort Heidenheim ist angesichts des bereits ohne Komposteinsatz relativ hohen Porenanteils plausibel.

Der Einfluss der Kompostgaben auf die **Aggregatstabilität** des Bodens war zum Versuchsabschluss relativ gering und uneinheitlich (vgl. Abbildung 29 unten). Ursache dafür sind die komplexen Faktoren, die für die Stabilität der Bodenkrümel verantwortlich zeichnen. Neben den positiven Humuseffekten tragen vor allem der Tonanteil sowie Carbonate und Eisenoxide als Kittsubstanzen dazu bei, dass sich unter Bildung von Ton-Humus-Komplexen stabile Bodenkrümel ausbilden. Auf leichten Böden ohne nennenswerte Tonanteile, wie dem sandigen Standort Forchheim, ist deshalb kaum eine signifikante Wirkung der Kompostgaben zu erwarten. Wie schon im Jahre 2002 hatten deshalb die langjährigen Kompostgaben in Forchheim keinen gesicherten Einfluss auf die Aggregatstabilität. Auch auf dem Versuch Stockach zeigte sich, nach positiven, aber nicht gesicherten Tendenzen im Jahre 2003, keine Kompostwirkung. Als Ursache kommt eine schon ohne Kompost absolut hohe Stabilität der Bodenkrümel infrage, die auf hohe Ton- und geringere Schluffanteile zurückzuführen ist, so dass durch Kompost keine weitere Verbesserung zu erzielen war. Auf dem Standort Heidenheim hatten die Kompostgaben dagegen - nach noch nicht vorhandenen Wirkungen im Jahre 2002 - zum Versuchsabschluss

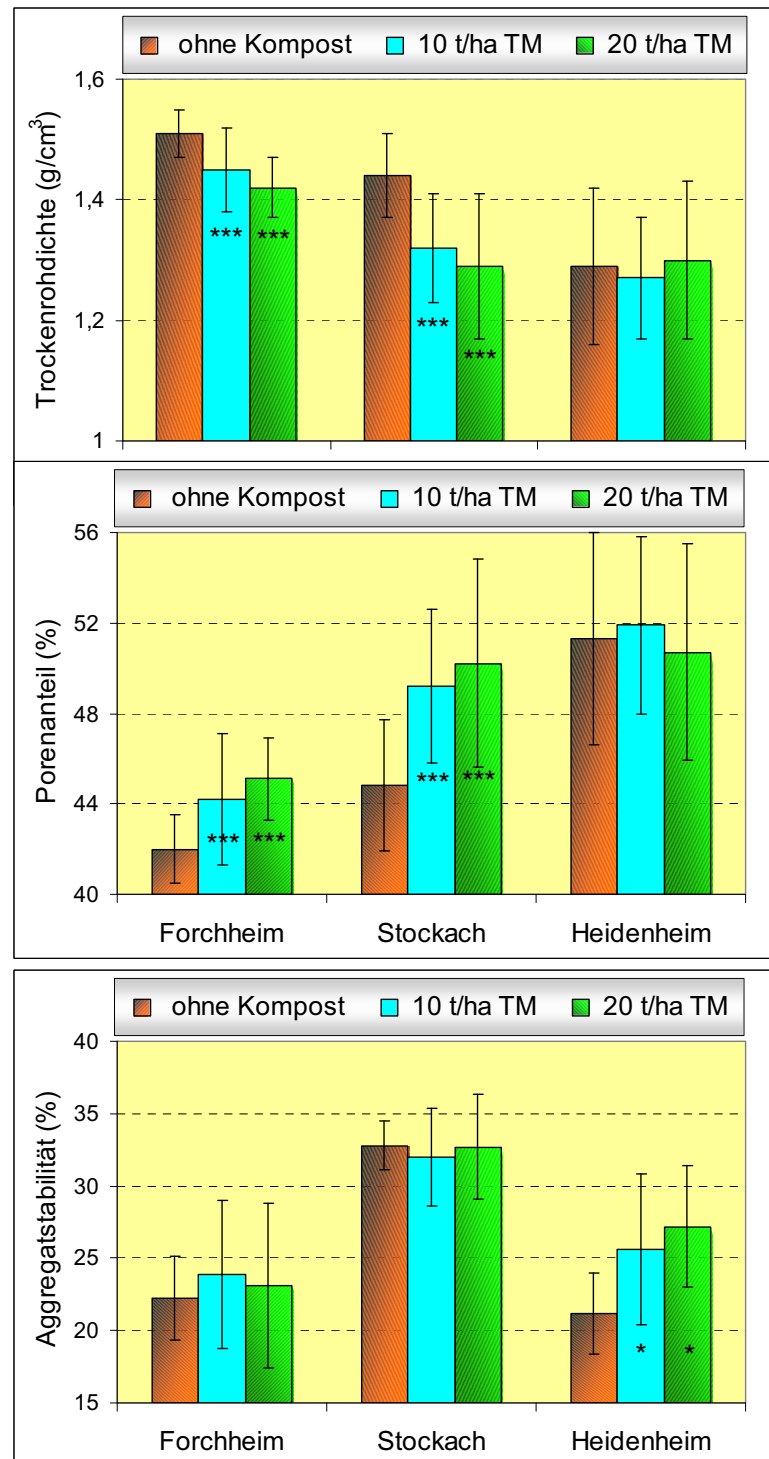


Abbildung 29 Wirkungen der Kompostgaben auf Parameter der Bodenstruktur
 (Trockenrohdichte - oben, Porenanteil - Mitte, Aggregatstabilität - unten)

Legende: Balken - Mittelwerte Varianten, Spannweiten - $\pm$ Standardabweichung Mittelwerte
 Stat. Sicherung der Kompostwirkungen im Vergleich zu Variante ohne Kompost (t-Test):
 (*) - α 5 - 10 %, * - α < 5 %, ** - α < 1 %, *** - α < 0,1 %

eine deutlich fördernde Wirkung. Die Aggregatstabilität nahm bei Kompostgaben von jährlich 10 bzw. 20 t/ha TM im Vergleich zur Kontrolle absolut um 4,4 bzw. 6,0 % zu, trotz der großen Streuung der Einzelwerte statistisch gesichert. Als Ursache dafür sind die - im Vergleich zu den anderen Versuchen - die sehr lockere Lagerung und der hohe Schluffanteil des Bodens anzusehen, optimale Bedingungen für eine Stabilisierung der Bodenkrümel durch Zufuhr an organischer Substanz. Diese Kompostwirkung ist, angesichts des relativ strukturlabilen Bodens, als eindeutig positiv zu bewerten, da sie dazu beiträgt, der Oberflächenverschlammung durch Niederschläge entgegenzuwirken.

C 2.2.2.1.2 Auswirkungen auf den Wasser- und Lufthaushalt des Bodens

Auf Parameter des Wasserhaushaltes der Versuchsböden hatte der Komposteinsatz im Ganzen einen positiven Einfluss. Besonders deutlich zeigte sich das bei der **Wasserkapazität**, mit der die potenzielle Wasserhaltefähigkeit der Bodenaggregate beschrieben wird (vgl. Abbildung 30 unten links). Sie stieg in allen Versuchen mit steigender Kompostgabe gesichert an, besonders deutlich auf dem mittleren Boden in Stockach.

Auch die **nutzbare Feldkapazität**, die den real von den Pflanzen nutzbaren Wasseranteil repräsentiert, nahm nach Kompostanwendung zu, allerdings nur beim leichten Standort Forchheim - im Einklang mit Ergebnissen aus dem Jahre 2002 - statistisch gesichert (vgl. Abbildung 30 oben links). Messbare Anhebungen auf dem Boden Heidenheim sind angesichts der großen Streuungen der Einzelwerte nur als Tendenz zu werten. In Stockach zeigte sich - im Unterschied zu deutlich positiven Wirkungen im Jahre 2002 - kein messbarer Komposteinfluss. Das ist darauf zurückzuführen, dass durch die Kompostanwendung vorrangig der Anteil an Grobporen zunahm, während die für die Wasserbindung maßgebenden Fein- und Mittelporen nicht beeinflusst wurden.

Ein differenziertes Bild liefern die Ergebnisse zur **Luftkapazität** des Bodens (vgl. Abbildung 30 rechts oben), die sich aus der Differenz zwischen dem Porenanteil und dem Wassergehalt bei Feldkapazität ergibt. Während die Kompostgaben auf dem Boden Stockach zu deutlichen und signifikanten Anhebungen führten, zeigte sich in Forchheim nur eine gering positive, nicht gesicherte Tendenz. In Heidenheim schien die Luftkapazität sogar zurückzugehen. Allerdings ist diese Tendenz angesichts der großen Streuungen der Einzelwerte als zufällig einzustufen. Ursache für diese scheinbar widersprüchlichen Ergebnisse ist der komplexe Wirkmechanismus, da in die Bestimmung der Luftkapazität mehrere Parameter, wie die Trockenrohdichte, die Kornrohdichte und die Feldkapazität eingehen, was in der Summe zu deutlichen Unterschieden zwischen einzelnen Standorten führen kann. Sie ist damit für Beurteilungen der Kompostwirkungen eher nachrangig.

Auch der **Wassergehalt** des Bodens fällt zwischen den drei Standorten unterschiedlich aus (vgl. Abbildung 30 unten rechts), vorrangig dadurch bedingt, dass er eine „Momentaufnahme“ zum Probenahmezeitpunkt nach der Ernte und nicht die gesamte Situation im Vegetationsverlauf darstellt. Deshalb sind Ergebnisse des Jahres 2002, die über die gesamte Vegetationsperiode gewonnen worden sind (ANONYM 2003A), als eher relevant einzustufen. Unter dieser Prämisse ergibt sich auf dem leichten Standort Forchheim ein ähnliches Bild wie 2002: signifi-

kant steigende Wassergehalte mit zunehmender Kompostgabe, die eine deutlich bessere Wasserbindung bei Komposteinsatz von absolut 1 - 2 % im Vergleich zur Kontrolle belegen.

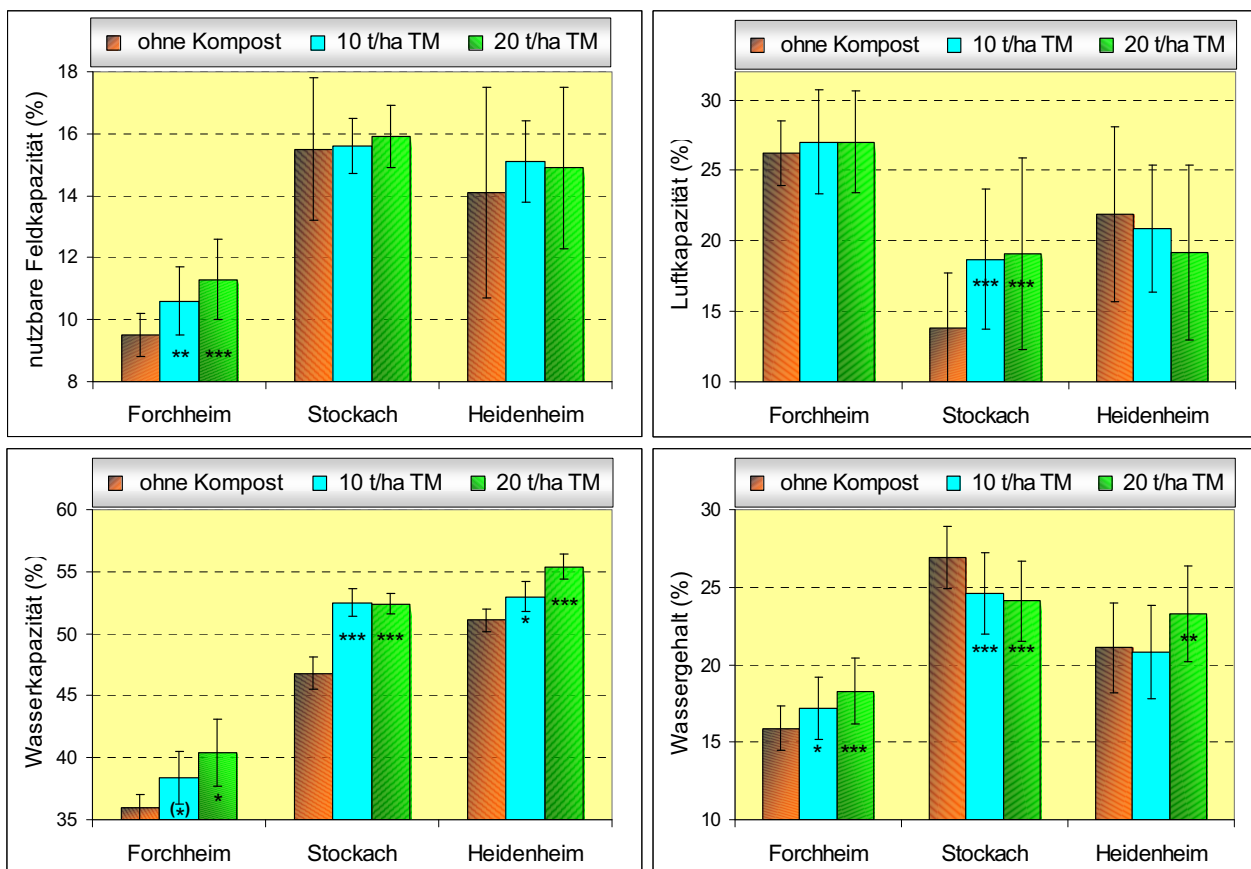


Abbildung 30 Wirkungen der Kompostgaben auf Parameter des Luft- und Wasserhaushaltes (nutzbare Feldkapazität - oben links, Luftkapazität - oben rechts, Wasserkapazität - unten links, Wassergehalt - unten rechts)

Hinweis⁴⁵: nutzbare Feldkapazität (nFK): Forchheim und Heidenheim - *minimale* nFK
Stockach - *maximale* nFK
Luftkapazität (LK): Forchheim und Heidenheim - *maximale* LK
Stockach - *minimale* LK

Legende: Balken - Mittelwerte Varianten, Spannweiten - $\pm$ Standardabweichung Mittelwerte
Stat. Sicherung der Kompostwirkungen im Vergleich zu Variante ohne Kompost (t-Test):
(*) - α 5 - 10 %, * - α < 5 %, ** - α < 1 %, *** - α < 0,1 %

Auch in Heidenheim war ein erhöhter Wassergehalt zu beobachten, allerdings nur bei der Variante mit der höchsten Kompostgabe. Auf dem Boden Stockach gingen die Wassergehalte dagegen - im Unterschied zu den deutlichen Anstiegen im Vegetationsverlauf 2002 - mit steigender Kompostgabe signifikant zurück. Als Erklärung dafür ist das relativ niedrige Gehaltsniveau

⁴⁵ Begründung:

Sandige Böden (Forchheim) und lößähnliche Böden (Heidenheim) verfügen über einen stärkeren Wasserabfluss in tiefere Bodenschichten. Die genannten Parameter werden deshalb realistischer durch die minimale nFK bzw. maximale LK beschrieben. Umgekehrt weisen sandige Lehme (Stockach) einen langsameren Wasserabfluss in tiefere Bodenschichten auf, der objektiv besser durch eine maximale nFK bzw. eine minimale LK charakterisiert wird.

zum Probenahmezeitpunkt anzusehen (nur ca. 80 % der Feldkapazität). Unter diesen Bedingungen haben die nachweislich höheren Pflanzenaufwüchse auf den Kompostvarianten (vgl. Punkt C 2.5) mit ihrer größeren Wurzelmasse sehr wahrscheinlich zu einem im Vergleich zur Kontrolle erhöhten Verbrauch des im Boden gespeicherten Wassers geführt - im Grunde eine positive Kompostwirkung. Auch eine höhere Evapotranspiration auf den Kompostvarianten ist denkbar.

Zur **Wasserdurchlässigkeit** des Bodens, auch als Wasserinfiltration bzw. -durchleitung bezeichnet, konnten keine Wirkungen festgestellt werden, die auf die Kompostgabe zurückzuführen wären (Einzelergebnisse vgl. Anlage 2, Teil 2, Tabelle 2.2.8). Ursache dafür war überwiegend die hohe bis sehr hohe Wasserdurchlässigkeit der Böden (Stechzylinderproben). Während das auf dem leichten Boden Forchheim auf die sandige Struktur zurückzuführen ist, waren auf den bindigeren Böden Stockach und Heidenheim sehr wahrscheinlich „Gröbstporen“, d.h. Regenwurmgänge, dafür verantwortlich, die zu einer sehr hohen Streuung der Einzelwerte führten. Auch mit der verwendeten Labormethode waren damit keine anderen Ergebnisse zu erzielen als mit der Feldmethode im Jahre 2002: Signifikant positive Einflüsse der Kompostgaben auf die Wasserdurchleitung waren mit den gegebenen Untersuchungsmethoden nicht zu bestimmen, überwiegend bedingt durch die zu große Streuung der Einzelergebnisse. Dieses Ergebnis steht nicht im Widerspruch zu den Beobachtungen auf den Kompost-Anwendungsversuchen sowie verschiedener befragter Landwirte, die eine bessere Wasserdurchlässigkeit und schnellere Abtrocknung der Böden nach Starkregenereignissen konstatierten, wenn Kompost eingesetzt worden war.

C 2.2.2.2 Bodenbiologische Wirkungen

Für die bodenbiologischen Untersuchungen wurden nach Abschluss der ausgewählten Kompost-Anwendungsversuche Forchheim, Stockach und Heidenheim im Sommer 2006 Schürfproben aus den Varianten 3, 9 und 12 entnommen (feldfeuchte Mischproben aus 4 Wiederholungen/Variante, Bodentiefe 10 - 15 cm). Die ausgewählten Parameter mikrobielle Biomasse, N-Mineralisation und alkalische Phosphatase wurden nach den Methoden gemäß Punkt B 3.3.2, Tabelle 16 untersucht. Zu den Einzelergebnissen und ihrer ausführlichen Bewertung vgl. Anhang 2, Teil 3.

Ergebnisse und ihre Bewertung:

Zu den maßgebenden bodenbiologischen Parametern zählt die **mikrobielle Biomasse**, die die Abbau- und Syntheseleistungen der Bakterien und Pilze charakterisiert, durch die letztlich anorganische Nährstoffe und Spurennährstoffe aus der organischen Substanz im Boden mobilisiert und damit pflanzenverfügbar werden. Die mikrobielle Biomasse nahm auf allen drei Standorten mit steigender Kompostgabe hochsignifikant zu (vgl. Relativwerte⁴⁶ in Abbildung 31 oben). Dabei fiel die Anhebung zwischen der Kontrollvariante ohne Kompost (V3) und der Kompostgabe von jährlich 10 t/ha TM (V9) auf den mittleren bis schweren Böden der Standorte Stockach und Heidenheim überwiegend höher aus als eine weitere Erhöhung der Kompostgabe auf jährlich 20 t/ha TM (V12), besonders deutlich im Versuch Stockach. Bestimmend für die Höhe der mikrobiellen Biomasse sind sowohl die Menge an organischer Substanz als auch der

⁴⁶ Die Absolutwerte der mikrobiellen Biomasse fallen auf den mittleren bis schweren Böden der Standorte Stockach und Heidenheim deutlich höher aus als auf dem leichten Boden Forchheim (vgl. Anhang 2, Teil 3, Tabelle 1).

pH-Wert. Der Humusgehalt nahm mit steigender Kompostgabe in der Größenordnung etwa linear zu. Dagegen stieg der pH-Wert zwischen der Kontrolle (V3) und der 1. Kompoststufe (V9) deutlich stärker an als zwischen V9 und der 2. Kompoststufe (V12). Das kann als wahrscheinliche Ursache für die stärkere Anhebung der Biomassegehalte in der 1. Kompoststufe auf den beiden Standorten Stockach und Heidenheim angesehen werden.

Anhaltspunkte darüber, ob die Entwicklung der Biomassegehalte lediglich Veränderungen in der organischen Substanz widerspiegelt oder ob sich spezifische An- bzw. Abreicherungsprozesse vermuten lassen, liefert das **C_{mic}/C_{org} -Verhältnis**⁴⁷. Die Ergebnisse in Tabelle 32 zeigen, dass sich die Standorte ganz unterschiedlich verhalten:

In Forchheim folgt die Biomasse recht eng der Akkumulation organischer Substanz durch das jahrelange Aufbringen von Kompost. Am Standort Stockach wird die Entwicklung aktiver Biomasse durch die Kompostaufbringung stärker gefördert als die Humusakkumulation, allerdings ist zwischen den Kompoststufen 1 und 2 kein Unterschied mehr festzustellen. In Heidenheim hingegen kann die Steigerung der Biomassegehalte nicht mit der Akkumulation von Humus Schritt halten. Ursache dafür kann die dort niedrigere Jahrestemperatur gewesen sein.

Auch die **N-Mineralisation** der Böden stieg auf allen Versuchstandorten mit steigenden Kompostgaben deutlich und hochsignifikant an (vgl. Abbildung 31 Mitte), besonders im Versuch Heidenheim. Die Mineralisationskapazität, d.h. die mikrobielle Freisetzung von düngewirksamen Stickstoff aus der organischen Bindung, nahm dabei besonders auffällig zwischen der Kontrolle ohne Kompost (V3) und der 1. Kompoststufe (V9) zu, Ausdruck dafür, dass der N-Gesamtgehalt des Bodens, der in den Versuchen mit steigender Kompostgabe weitgehend linear anstieg, diese Aktivitätsunterschiede nicht hinreichend erklären kann.

Letztlich nahm auch die **Phosphatase-Aktivität** der Böden, die das Potenzial zur Mineralisierung von organisch gebundenem Phosphor in anorganisches - und damit pflanzenaufnehmbares - Orthophosphat (PO_4^{3-}) charakterisiert, mit steigenden Kompostgaben allgemein hochsignifikant⁴⁸ zu, besonders deutlich auf dem Versuchsstandort Stockach (vgl. Abbildung 31 unten). Die hohen Phosphorzufuhren mit den regelmäßigen Kompostgaben wurden demnach, bedingt durch diese steigende Phosphatase-Aktivität des Bodens, auch zügig pflanzenaufnehmbar und düngewirksam, wie auch die höheren löslichen Phosphorgehalte im Boden belegten (vgl. Punkt C 2.2.1.6). Dabei sind die Aktivitätsunterschiede nicht allein durch die steigenden absoluten Anteile an mikrobieller Biomasse zu erklären (wie der Vergleich der Standorte Stockach und Heidenheim zeigt), die in Heidenheim deutlich höher ausfielen als in Stockach, während die Phosphatase-Aktivität in Stockach stärker anstieg. Ursache dafür dürfte neben dem unterschiedlichen pH-Einfluss sehr wahrscheinlich auch das Niveau der löslichen Phosphatgehalte im Boden sein, das in Heidenheim deutlich höher lag als in Stockach. Erhöhte Phosphatgehalte können die Phosphatase-Aktivität des Bodens vermindern bzw. sogar hemmen. Umgekehrt kann damit gerechnet werden - das ist als weiterer Vorteil der Kompostanwendung anzusehen -, dass unter Bedingungen niedriger Gehalte an löslichem Phosphat im Boden durch die steigende Phosphatase-Aktivität verstärkt pflanzenaufnehmbares Phosphat aus der organischen Substanz freigesetzt wird.

⁴⁷ C_{mic}/C_{org} -Verhältnis - Verhältnis zwischen mikrobiellem Kohlenstoff und organischem Kohlenstoff im Boden.

⁴⁸ Die geringere Signifikanz auf dem Standort Heidenheim ist auf die relativ hohe Streuung der Kontrollvariante ohne Kompost zurückzuführen.

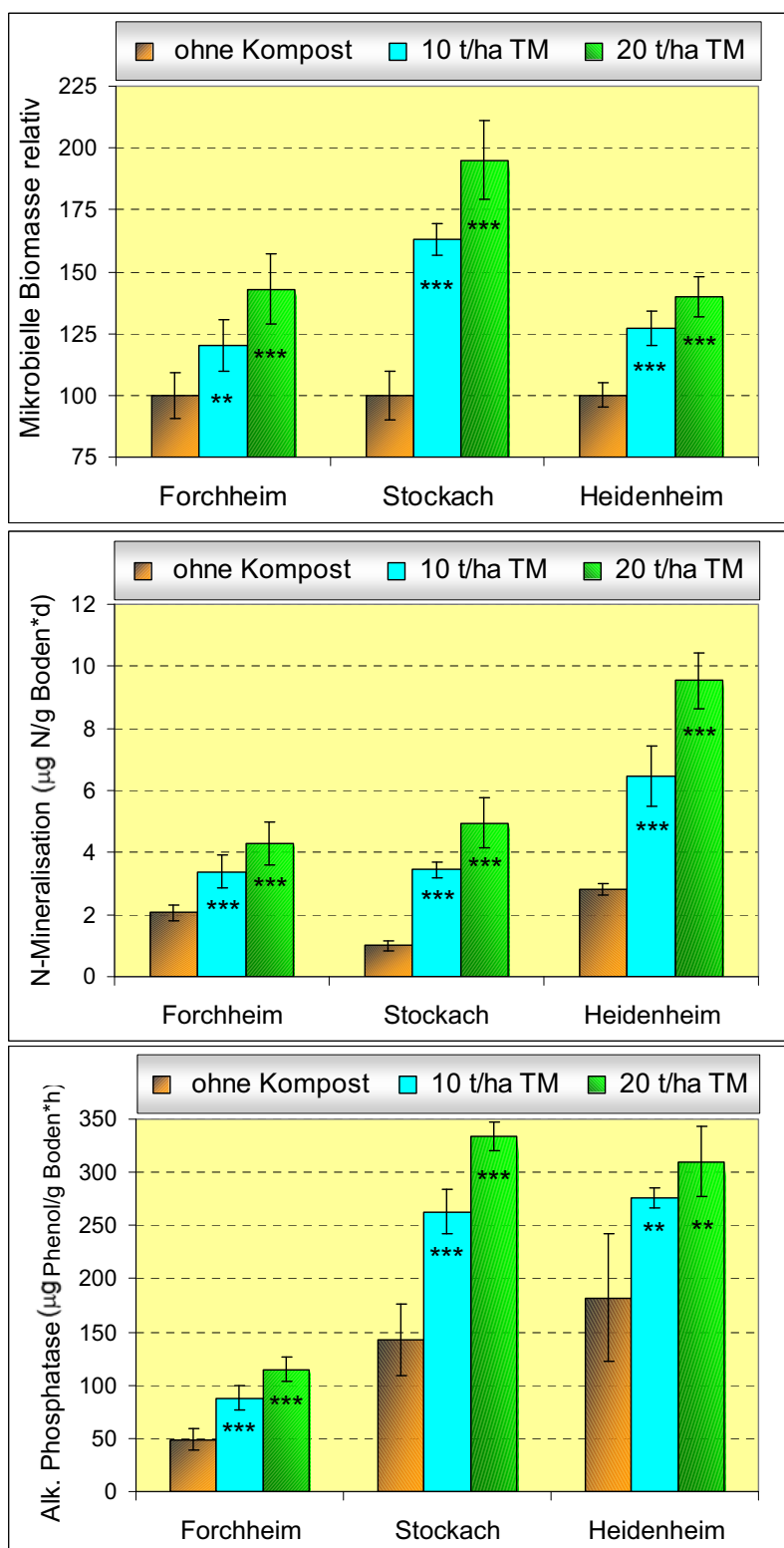


Abbildung 31 Wirkungen der Kompostgaben auf bodenbiologische Parameter (mikrobielle Biomasse - oben, N-Mineralisation - Mitte, alkalische Phosphatase - unten)

Legende: Balken - Mittelwerte Varianten, Spannweiten - $\pm$ Standardabweichung Mittelwerte
 Stat. Sicherung der Kompostwirkungen im Vergleich zu Variante ohne Kompost (t-Test):
 * - $\alpha < 10\%$, ** - $\alpha < 5\%$, *** - $\alpha < 1\%$

Tabelle 32 C_{mic}/C_{org} -Verhältnis der Böden (mg C_{mic} /g C_{org}) der drei Versuchsstandorte

Kompostgabe jährlich t/ha TM	Standort		
	Forchheim	Stockach	Heidenheim
ohne	15,0	21,4	25,1
10	15,1	27,3	22,5
20	14,7	25,7	20,0

C 2.2.2.3 Abschließende Bewertung der bodenphysikalischen und -biologischen Wirkungen

Die bodenkundlichen Untersuchungsergebnisse nach Abschluss der ausgewählten Versuche, d.h. nach neun (Heidenheim) bzw. zwölf Versuchsjahren (Forchheim, Stockach), unterstreichen die Bewertungen der ersten Versuchsperiode 1995 - 1997 (vgl. ANONYM 1999) sowie der zweiten Versuchsperiode 1998 - 2002 (DBU-Projekt vgl. ANONYM 2003A), dass die maßgebende, häufig sogar vorrangige Bedeutung der regelmäßigen Kompostanwendung in der *allseitigen Verbesserung der bodenphysikalischen und -biologischen Bodenparameter* besteht. Entscheidend dafür ist die beträchtliche Zufuhr an organischer Substanz, da die relevanten Bodenparameter letztlich über die Anhebung und Optimierung des Humusgehaltes positiv beeinflusst werden.

Die Untersuchungen belegen anschaulich, dass dabei in der Regel komplexe funktionale Beziehungen zwischen den einzelnen Bodenparametern typisch sind. Meist werden mit Faktoren der Bodenstruktur auch Parameter des Wasserhaushaltes und der Bodenbiologie verändert und umgekehrt. Ausdruck dieser komplexen Zusammenhänge ist es auch, wie sich bei den Untersuchungen gezeigt hat, dass in Abhängigkeit von Standort- und Bodenbedingungen große Schwankungen zu verzeichnen sind und die vorteilhaften Veränderungen - im Unterschied z.B. zur P- und K-Düngewirkung von Komposten - überwiegend erst mittel- bis langfristig wirksam werden, dabei aber auch von kurzfristigen Effekten überlagert, manchmal sogar aufgehoben werden können. Bei der Beurteilung der bodenverbessernden Kompostwirkungen ist deshalb davon auszugehen, dass eindeutig belegbare, statistisch gesicherte Ergebnisse in diesem Bereich eher selten sind, gleichwohl die Vorteilswirkungen praktisch nachweisbar auftreten und sich in einer allmählich verbesserten Bodenfruchtbarkeit und steigenden Erträgen niederschlagen.

Ausgehend von diesen grundsätzlichen Erwägungen wird die Beurteilung der bodenphysikalischen und -biologischen Wirkungen regelmäßiger Kompostgaben anhand der aktuellen Versuchsergebnisse nach Versuchsabschluss (vgl. Punkte C 2.2.2.1 und C 2.2.2.2) unter Einbeziehung der Erfahrungen und Schlussfolgerungen früherer Untersuchungen der Kompost-Anwendungsversuche (ANONYM 1999, ANONYM 2003A) sowie auch unter Berücksichtigung der neuesten Literatur und der praktischen Erfahrungen von Landwirten vorgenommen. Daraus ergibt sich **folgendes Gesamtbild** (vgl. Tabelle 33):

Unter den Parametern der **Bodenstruktur** wird die *Trockenrohdichte* bzw. *Lagerungsdichte* durch Kompostgaben recht eindeutig abgesenkt. Umgekehrt nimmt mit abnehmender Lagerungsdichte der gesamte *Porenanteil* überwiegend spürbar zu, auf schweren Böden aber seltener. Durch die lockerere Lagerung und die zunehmenden Porenanteile der Böden verbessern sich Drainage und Durchlüftung der Böden, eine konkrete Vorteilswirkung. Letztlich kann auch die *Luftkapazität* von Böden ansteigen, wenn Porenanteil und Lagerungsdichte verbessert wer-

den. Weniger eindeutig, aber häufig feststellbar ist eine Zunahme der *Aggregatstabilität* der Böden. Sie hängt von zahlreichen Faktoren ab (z.B. Bildung von Ton-Humus-Komplexen, Anteil von Kittsubstanzen) und ist vorrangig auf mittleren und schweren Böden, kaum jedoch auf leichten sandigen Böden zu erwarten. Deshalb kann der Komposteinsatz vor allem auf mittleren bis schweren Böden mit ungünstiger Bodenstruktur (Bodenverdichtungen) vorteilhaft wirken, weil sich dadurch die Bodenelastizität und damit die Belastbarkeit des Bodens positiv beeinflussen lassen.

Tabelle 33 Wirkungen regelmäßiger Kompostgaben auf Bodenstruktur, Wasser- und Lufthaushalt sowie Bodenmikrobiologie

Parameter	Versuchsstandorte				
	Forchheim ¹	Weierbach ²	Stockach ¹	Ellwangen ²	Heidenh. ¹
Bodenstruktur					
Aggregatstabilität	—	↑↑	↗	↑↑	↗
Porenanteil	↑↑	↑	↑↑	—	—
Luftkapazität	↗	n.b.	↑↑	n.b.	—
Lagerungsdichte	↑↑	↗	↑↑	↑	—
Wasserhaushalt					
Nutzbare Feldkapazität	↑↑	↑↑	↑	—	↗
Wassergehalt	↑↑	↑	↑	↑↑	↗
Wasserkapazität	↑↑	↑	↑↑	↑	↑↑
Wasserdurchlässigkeit	—	↗	—	—	—
Bodenmikrobiologie					
Mikrobielle Biomasse	↑↑	↑	↑↑	↑↑	↑↑
Phosphataseaktivität	↑↑	n.b.	↑↑	n.b.	↑↑
N-Mineralisation	↑↑	n.b.	↑↑	↑	↑↑

Anm.: ¹ Versuchsergebnisse 2002 und 2006 ² Versuchsergebnisse 2002

Legende:

- ↑↑ eindeutige Verbesserung, direkter Zusammenhang mit Kompostgabe
- ↑ messbarer Trend zur Verbesserung
- ↗ Tendenz zur Verbesserung, unsicher
- kein Einfluss
- ↘ Tendenz zur Verschlechterung, unsicher
- ↓ messbarer Trend zur Verschlechterung
- ↓↓ eindeutige Verschlechterung
- n.b. Parameter wurde nicht bestimmt

Verbesserung heißt: Lagerungsdichte nimmt ab, alle übrigen Parameter steigen an

Verschlechterung heißt: Lagerungsdichte steigt, alle übrigen Parameter nehmen ab

Fast noch eindeutiger feststellbar sind die positiven Wirkungen regelmäßiger Kompostgaben auf den **Wasserhaushalt** des Bodens. In der Regel wird die *Wasserkapazität* der Böden, die das Wasserbindungspotenzial und damit die Kompostwirkung im Idealfall widerspiegelt, deutlich verbessert, wie die Versuche im Einklang mit Literaturergebnissen und Praxisbeobachtungen belegen. Besonders deutliche und gesicherte Anhebungen der Wasserkapazität waren auf den mittleren und schweren Böden, geringere auf dem sandigen Boden Forchheim zu beobachten. Diese positive Tendenz dokumentiert sich im allgemeinen auch im *Wassergehalt* des Bodens, wie die Anhebungen von absolut 1 - 2 % nach Kompostanwendung im Vegetationsverlauf 2002 zeigten (ANONYM 2003A). Einzelmessungen als „Momentaufnahmen“ können davon abweichen, bis hin zu Absenkungen der Wassergehalte (Standort Stockach 2006), die sich aber durch eine größere Wassernutzung der Pflanzen als Folge der Kompostanwendung erklären lassen. Ähnliches gilt für die *nutzbare Feldkapazität* - durch den Anstieg des Anteils an Mittel- und Grobporen für den „pflanzenverfügbaren“ Wassergehalt maßgebend -, die bei Komposteinsatz grundsätzlich positiv beeinflusst wird, aber im Einzelfall auch unverändert bleiben kann. Insgesamt ist der erhöhte verfügbare Wasservorrat des Bodens, wie die drei Parameter belegen, eine der entscheidenden Vorteilswirkungen der Kompostanwendung. Bei länger anhaltender Trockenheit können die Pflanzenbestände dadurch Perioden von Trockenstress besser überstehen, vor allem auf leichten bzw. grundwasserfernen Böden. Eine mögliche Erhöhung der *Wasserdurchlässigkeit* der Böden bei Kompostanwendung konnte bisher aus messtechnischen Gründen (zu große Streuung der Einzelwerte) noch nicht belegt werden. Unabhängig davon kann man aber auf Grund der Beobachtungen an den Versuchen und auch von praktischen Landwirten, nach denen eine schnellere Abtrocknung der mit Kompost behandelten Böden nach Starkregenereignissen belegbar ist, von einer solchen Vorteilswirkung ausgehen, zumal dafür auch die Bodenlockerung und die Zunahme des Porenanteils sprechen.

Eindeutig und klar zeigten sich nach Abschluss der langjährigen Versuche die positiven Wirkungen regelmäßiger Kompostanwendung auf die maßgebenden Parameter der **Bodenbiologie**, die mikrobielle Biomasse, die N-Mineralisation und die Phosphatase-Aktivität, die fast durchweg hochsignifikant verbessert wurden. Bei mikrobieller Biomasse und N-Mineralisation⁴⁹ war die Ausprägung der Kompostwirkung dabei stärker als im Jahre 2002 (DBU-Bericht vgl. ANONYM 2003A), ein Indiz dafür, dass regelmäßige Kompostgaben neben Bodenstruktur und Wasserhaushalt vor allem die *mikrobielle Aktivität des Bodens*, d.h. das für die Bodenfruchtbarkeit so wesentliche *Bodenleben*, spürbar verbessern können.

Für zunehmende Gehalte an *mikrobieller Biomasse* sind neben der organischen Substanz und dem damit korrelierenden Humusgehalt sehr wahrscheinlich auch steigende pH-Werte, die durch die Kalkwirkung der Kompostgaben bewirkt werden, verantwortlich. Das $C_{\text{mic}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis der Böden ermöglicht Hinweise darauf, ob die Biomassegehalte lediglich Veränderungen der organischen Substanz des Bodens widerspiegeln oder ob zusätzliche An- bzw. Abreicherungsprozesse wirksam wurden. Während die Entwicklung aktiver Biomasse durch die Kompostanwendung auf dem Versuch Stockach stärker gefördert wurde als der Humusaufbau, war auf dem Versuch Heidenheim eine gegenteilige Entwicklung zu beobachten: Die Steigerung der Biomassegehalte konnte mit der Humusakkumulation nicht Schritt halten. Besonders

⁴⁹ Die Phosphatase-Aktivität war 2002 nicht bestimmt worden, so dass ein Vergleich nicht möglich ist.

wertvoll war die gesicherte Feststellung, dass die *N-Mineralisation* der Böden nach Kompostanwendung stärker steigt, als es die leicht zunehmenden N-Gesamtgehalte erwarten lassen. Das N-Mineralisierungsgleichgewicht im Boden wird offenkundig nach mehrjähriger Kompostanwendung - wie auch die dann höheren N-Ausnutzungsraten belegen (vgl. Punkt C 2.4.1) - durch die Aktivierung des Bodenlebens verstärkt in Richtung löslicher und damit düngewirksamer N-Anteile verschoben. Die anfangs geringe düngewirksame N-Fracht steigt demnach mit zunehmender Anwendungsdauer an. Als sehr vorteilhaft ist auch die gesicherte Zunahme der *Phosphatase-Aktivität* des Bodens zu bewerten. Dadurch wird die Mineralisierung organisch gebundener Phosphoranteile der Kompostgaben gefördert, sehr wahrscheinlich bei nicht zu hohen Anteilen an löslichem Phosphat im Boden mehr als dem Biomasseanteil entspricht. Das ist als weiterer Beleg für die vergleichsweise hohe Düngewirksamkeit der P-Gesamtzufuhren mit Kompostgaben zu werten, die nach den Untersuchungen zur P-Ausnutzung (vgl. Punkt C 2.4.2) in der Düngebilanz voll angerechnet werden können.

Insgesamt belegen die wissenschaftlichen Ergebnisse zur Bodenbiologie, dass landwirtschaftlich genutzte Boden mit regelmäßigen Kompostgaben in ihrem Bodenleben nachhaltig aktiviert und verbessert werden können, insbesondere durch die Förderung der Umsetzungsprozesse im Boden (Mineralisation der organischen Substanz, Freisetzung von düngewirksamen Nährstoffen) - ein Ergebnis, dass inzwischen durch zahlreiche Feldbeobachtungen von praktischen Landwirten bestätigt wurde. Nicht zuletzt kann auch das phytosanitäre Potenzial des Bodens, seine Widerstandsfähigkeit gegen Schadorganismen, verbessert werden. Das kann sich, wie in den Versuchen beobachtet wurde, z.B. positiv auf die Unterdrückung von Fusarien bei W.Weizen auswirken, indem infektiöse Erntereste zügiger abgebaut werden (GRISOT 2002, GUEINZIUS und THALMANN 2003). Nach den Erfahrungen aus den langjährigen Kompost-Anwendungsversuchen hat sich damit der Gesamteindruck erhärtet, dass der Förderung der Bodenbiologie ein wesentlicher Anteil an der allmählichen Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit als Folge regelmäßiger Kompostgaben zukommt.

C 2.3 Wirkungen auf die Ernteprodukte

C 2.3.1 Nährstoffgehalte und -entzüge

Im Vergleich zur ausführlichen Beurteilung der Nährstoffgehalte in Haupt- und Nebenernteprodukten in Abhängigkeit von der Kompostgabe im DBU-Bericht 2003 (ANONYM 2003A) hat die Versuchsperiode bis zum Versuchsabschluss 2006 keine neueren Erkenntnisse erbracht. Nachfolgend werden deshalb die Ergebnisse aus der letzten Fruchtfolgerotation 2004 - 2006 komprimiert ausgewertet.

C 2.3.1.1 Nährstoffgehalte

Haupternteprodukte

Im Mittel aller Versuche (vgl. Anhang 1, Tabelle 6-10) wurden die **N-Gehalte** von S.Mais (Ausnahme Versuch Stockach: Anhebung) bzw. K.Mais (Versuchsjahr 2004) durch Kompostgaben nicht beeinflusst. In den Versuchsjahren 2005 (W.Weizen) und 2006 (W.Gerste) zeigte sich eine Tendenz zu erhöhten N-Gehalten im Korn. Die **K-Gehalte** im Korn wurden kaum verändert,

in S.Mais stiegen sie vereinzelt an. Die **P-** und **Mg-Gehalte** der Haupternteprodukte wurden durch die Kompostgaben durchweg nicht verändert.

Es zeigt sich damit, dass sich schon die relativ geringe N-Mineralisierung der Kompostzufuhren schwach positiv auf die N-Versorgung von Getreidearten auswirken kann. Die nachweisbare Erhöhung der K-Verfügbarkeit im Boden (vgl. Punkt C 2.2.1.6) bewirkt spürbare Anhebungen der K-Gehalte, vorrangig bei S.Mais.

Nebenernteprodukte

Die **N-Gehalte** im Stroh wurden im Mittel aller Versuche (vgl. Anhang 1, Tabelle 6-11) durch Kompostgaben deutlich bei W.Gerste (Versuchsjahr 2006) angehoben, Ausdruck für die erhöhte N-Mineralisierung im Boden am Versuchsende, während die Strohgehalte von K.Mais (2004) und W.Weizen (2005) unbeeinflusst blieben. Im Unterschied zu den Haupternteprodukten stiegen die **K-Gehalte** im Stroh nach Kompostanwendung allgemein an, bei K.Mais in der Tendenz, jedoch deutlich bei W.Weizen und noch stärker bei W.Gerste. Ähnlich wie bei den Haupternteprodukten wurden die **P-** und **Mg-Gehalte** im Stroh durch die Kompostgaben durchweg nicht beeinflusst.

Die Versuche belegen - im Einklang mit der allgemeinen Erfahrung der Pflanzenernährung und Düngung - eine stärkere Reaktion des vegetativen Wachstumsapparates der Pflanzen (Stroh) auf die verbesserte Nährstoffzufuhr mit den Kompostgaben als die generativen Organe (Korn). Das wirkt sich in der Tendenz erhöhend auf die N-Gehalte des Strohes aus, deutlicher aber auf die K-Gehalte.

Zusammenfassend belegen die Versuche, dass durch die Nährstoffzufuhr mit Kompostgaben (vgl. Punkt C 2.1.1.2) die Pflanzengehalte an Stickstoff und Kalium, vor allem im Stroh, positiv beeinflusst werden können. Allerdings ist diese Nährstoffwirkung im Vergleich zu regulären Düngungsmaßnahmen als untergeordnet einzuschätzen. Die Phosphorzufuhr hat keine Auswirkungen auf die Pflanzengehalte. Noch mehr trifft das für die Magnesiumzufuhr zu, die sich trotz des deutlichen Positivsaldos nicht in den Pflanzengehalten widerspiegelt.

C 2.3.1.2 Nährstoffentzüge

Durch die relativ geringe Wirkung der Kompostgaben auf die Nährstoffgehalte der Ernteprodukte folgten die Nährstoffentzüge in den Versuchen im allgemeinen der Ertragsentwicklung (Einzeldaten Nährstoffentzüge in Anhang 1: Haupternteprodukte - Tabellen 1-14 bis 6-14, Nebenernteprodukte - Tabellen 1-15 bis 6-15, Summe - Tabellen 1-16 bis 6-16). Das trifft ohne Einschränkung auf die P- und Mg-Entzüge zu. Bei Stickstoff und noch deutlicher bei Kalium waren dagegen teilweise erhebliche Mehrentzüge nach Kompostanwendung im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost zu verzeichnen. Dies gilt vor allem für die Kompostanwendung in S.Mais-Fruchtfolgen, die in den Versuchen höhere Mehrerträge erbracht haben.

Der Anteil des Strohentzuges an der Summe der Nährstoffentzüge beträgt bei Stickstoff und Phosphor nach den Versuchsergebnissen im Mittel etwa 10 - 15 % und bei Magnesium etwa 20 - 25 %, bei Kalium dagegen 40 - 50 %. Für die Kalium-Düngebilanz und -effizienz (vgl. Punkt C 2.4) ist es deshalb wesentlich, ob beide Ernteprodukte abgefahren werden oder das

Stroh auf dem Acker verbleibt. Bei Stickstoff und Phosphor ist das dagegen weniger maßgebend.

Eine weitgehend ausgeglichene Düngebilanz einzuhalten, ist für Kalium und Phosphor kaum problematisch, da bei einer fehlenden Grunddüngung die Zufuhren beider Nährstoffe mit pflanzenbaulich optimalen Kompostgaben etwa dem Düngbedarf entsprechen und vor allem bei Kalium durch die Abfuhr aller Ernteprodukte dem Boden komplett entzogen werden können. Bei Magnesium ist auf Grund des unvermeidlichen Positivsaldos (vgl. Punkt C 2.1.1.2) keine ausgeglichene Düngebilanz möglich. Die Mg-Überhänge sind aber nicht von Nachteil, weil sie der permanenten Mg-Auswaschung aus dem Boden entgegen wirken. Die hohe N-Zufuhr mit Kompostgaben muss beobachtet werden, da auf Grund der geringen Mineralisierungsquote (vgl. Punkt C 2.4.1) ein größerer Anteil im Boden, gebunden an die organische Substanz, verbleibt. Zu hohe N-Positivsalden sind zu vermeiden, um negative Auswirkungen (Nitrateinwaschung in das Grundwasser) zuverlässig zu verhindern.

C 2.3.2 Schwermetallgehalte und -entzüge

C 2.3.2.1 Schwermetallgehalte

Die **Schwermetallgehalte** der Ernteprodukte bewegten sich auf allen Versuchsstandorten während des gesamten Versuchszeitraums auf einem unbelasteten, für die gegebenen Boden- und Standortbedingungen typischen Niveau. Sogenannte „natürliche“ Gehaltsbereiche von Pflanzen für unbelastete Böden (vgl. Tabelle 34) wurden nicht überschritten⁵⁰.

Die Schwermetallgehalte der **Haupternteprodukte** Korn bzw. S.Mais (vgl. Anhang 1, Tabellen 1-12 bis 6-12) blieben im Mittel von der mehrjährigen Kompostanwendung weitgehend unbeeinflusst. Das trifft im Zeitraum der letzten Fruchtfolgerotation 2004 - 2006 durchweg für Cu, Zn und Hg zu, bei W.Weizen und W.Gerste auch für Cr. Die Gehalte an Pb gingen bei allen Fruchtarten mit zunehmender Kompostgabe sogar leicht zurück, bei S.Mais zudem auch die Gehalte an Cd, Cr und Ni und bei W.Weizen zusätzlich die Gehalte an Cd und Ni. Als Ursache dafür ist mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit die geringere Verfügbarkeit dieser Schwermetalle als Folge der pH-Erhöhung mit steigenden Kompostgaben anzusehen, die sich auch in sinkenden mobilen Gehalten dokumentiert hat (ANONYM 2003A).

Ähnliche Tendenzen waren auch bei den Schwermetallgehalten der **Nebenernteprodukte (Stroh)** zu beobachten (vgl. Anhang 1, Tabellen 1-13 bis 6-13): Gehalte durchweg im Bereich sog. „natürlicher“ Konzentrationen gemäß Tabelle 34, dabei keine Anhebungen infolge der Kompostanwendung. Die Gehalte blieben entweder völlig unbeeinflusst (Cu, Zn, Hg) oder gingen nach Kompostanwendung sogar leicht zurück (Pb für K.Mais, Cd, Cr und Ni für alle Fruchtarten).

⁵⁰ Ausnahme: im Korn von W.Weizen wurden in Versuchsjahren 1999 (Versuche Forchheim, Weierbach und Stockach) und 2002 (Versuche Weierbach und Heidenheim) erhöhte Pb-Gehalte ermittelt. Das traf auf alle Varianten, d.h. unabhängig von der Kompostanwendung zu. Die einmalige Erhöhung ist als Analysenfehler einzustufen. Sie wurde deshalb bei der Gesamtbewertung nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die langjährige Kompostanwendung keine Anhebungen der Schwermetallgehalte der Ernteprodukte verursacht hat. Es waren - im Gegenteil - bei einigen Schwermetallen (Pb, Cd, Cr, Ni) sogar geringe Senkungen der Schwermetallkonzentrationen nach Komposteinsatz zu beobachten. Die Schwermetallaufnahme wird damit offenkundig ganz überwiegend vom gegebenen Schwermetallpool des Bodens und seiner Pflanzenverfügbarkeit bestimmt. Die im Vergleich dazu geringen Schwermetallzufuhren mit den

Tabelle 34 Mittlere Gehaltsbereiche für „natürliche“⁵¹ Schwermetallgehalte in mg/kg TM der in den Kompost-Anwendungsversuchen angebauten Fruchtarten

Schwermetall	Getreidearten		Körnermais		Silomais
	Korn	Stroh	Korn	Stroh	Aufwuchs
Pb	0,02 - 0,20	0,10 - 1,0	0,05 - 0,10	0,20 - 2,0	0,20 - 1,0
Cd	0,01 - 0,10	0,02 - 0,20	0,005 - 0,02	0,05 - 0,50	0,02 - 0,20
Cr	0,03 - 0,20	0,20 - 2,0	0,10 - 0,50	0,50 - 3,0	0,10 - 1,0
Ni	0,10 - 1,0	0,20 - 1,0	0,20 - 1,0	0,50 - 3,0	0,20 - 2,0
Cu	2,0 - 8,0	2,0 - 8,0	1,5 - 5,0	3,0 - 10	3,0 - 10
Zn	20 - 50	5,0 - 20	15 - 50	15 - 50	15 - 50
Hg	0,005 - 0,030	0,010 - 0,025	0,010 - 0,050	0,010 - 0,050	0,010 - 0,050

Kompostgaben sind dem untergeordnet und fallen nicht ins Gewicht. Durch die gleichzeitige pH-Erhöhung wird zudem einer erhöhten Pflanzenverfügbarkeit der Schwermetalle vorgebeugt. Nach den vorliegenden, nun langjährigen Versuchsergebnissen ist eine Gefährdung der Qualität pflanzlicher Nahrungsmittel durch Schwermetalleinträge in den Boden mit regelmäßigen Kompostgaben praktisch ausgeschlossen.

C 2.3.2.2 Schwermetallentzüge

Die **Schwermetallentzüge der Ernteprodukte** folgen in allen Feldversuchen weitgehend der Ertragsentwicklung (Einzelergebnisse vgl. Anhang 1, Tabellen 1-17 bis 6-17 Haupternteprodukt, Tabellen 1-18 bis 6-18 Nebenernteprodukt, Tabellen 1-19 bis 6-19 Summe Ernteprodukte). Sie bestätigen damit über einen nun relativ langen Versuchszeitraum von 9 bzw. 12 Jahren einen Trend, der sich schon im DBU-Projekt 2003 (ANONYM 2003A) abgezeichnet hatte.

Ursache dafür ist die Schwermetallaufnahme der Pflanze, die - wie auch die kaum veränderten Pflanzengehalte unterstreichen - ganz überwiegend vom gegebenen Schwermetallpool des Bodens und seiner Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit abhängt, die durch die standorttypische Bewirtschaftung beeinflusst wird. Sie wird durch die Schwermetallzufuhr mit den Kompostgaben im Grunde nicht - in Einzelfällen marginal - tangiert.

⁵¹ „Natürliche“ Gehaltsbereiche für Pflanzen in Anlehnung an BERGMANN (1993), wie sie auf Böden mit Schwermetallgehalten unterhalb der Hintergrundwerte und ohne anthropogene Kontamination bzw. ohne geogen erhöhte Gehalte gefunden werden.

Die **Bilanz der Schwermetalle** fällt bei Einsatz von Kompost in pflanzenbaulich optimalen Gaben, wie Abbildung 32 anschaulich zeigt, stets positiv aus, weil die Schwermetallentzüge bei optimalen Erträgen⁵² immer nur *Bruchteile der Schwermetallzufuhr* durch die Kompostgaben betragen⁵³. Im Mittel der Versuche bewegten sich die Schwermetallentzüge (Summe aller Ernteprodukte) in Relation zur Schwermetallzufuhr mit maximal zulässigen Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM in aufsteigender Reihenfolge in folgenden Größenordnungen:

Pb < Cr < Ni deutlich unter 5 %, Cu < Cd zwischen 5 und 10 %, Zn < Hg zwischen 10 und 30 % der Zufuhr mit den Kompostgaben. Dabei können im Einzelfall deutliche Abweichungen von diesen mittleren Bereichen auftreten. Vor allem in entzugsstarken Fruchtfolgen sind höhere Schwermetallentzüge und damit höhere Relativanteile an der Schwermetallzufuhr möglich, wie die Versuche mit S.Mais-Fruchtfolge zeigen (vgl. Einzelergebnisse in Anhang 1, Tabellen 3-19 bis 6-19). Der unvermeidliche Positivsaldo kann dadurch messbar gemindert werden. Die Positivsalden fallen umso niedriger - und im Sinne des Bodenschutzes umso günstiger aus -, wenn alle Ernteprodukte (Haupternteprodukte plus Stroh) abgefahren und niedrigere Kompostgaben

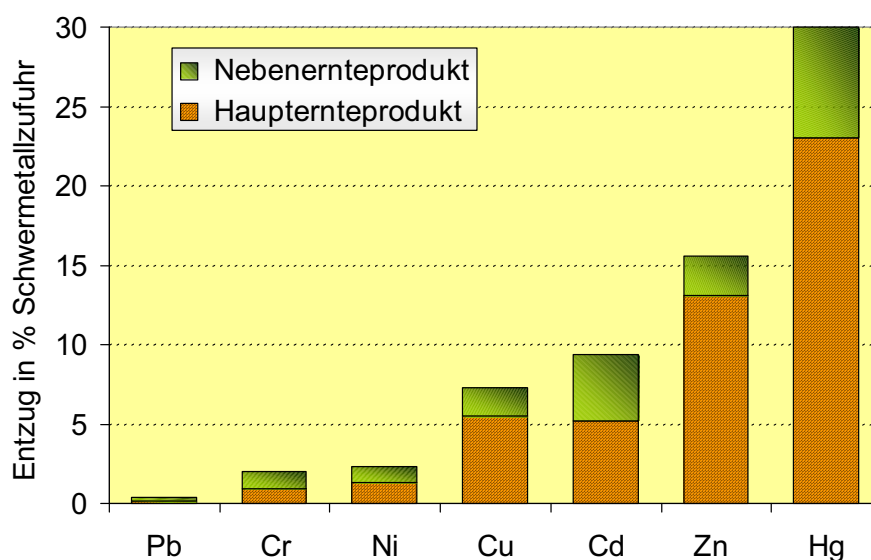


Abbildung 32 Schwermetallentzüge der Ernteprodukte in Relation zur Schwermetallzufuhr durch Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM:

Mittel aller Versuche der letzten Fruchtfolgerotation (Zeitraum 2004 - 2006)

Schwermetallentzüge: Variante 3 mit optimaler N-Gabe und ohne Kompostgabe (Stufen N2K0)
 Zwei Versuche (Fo, We) mit K.Maisfruchtfolge, drei Versuche (St, El, He) mit S.Maisfruchtfolge

⁵² Die Saldierung bezieht sich durchweg auf Schwermetallentzüge bei optimalen Erträgen, d.h. bei optimaler N-Ergänzungsdüngung (Stufe N2), die für die pflanzenbauliche Praxis realistisch sind. Diese Entzüge bewegen sich auf gleichem Niveau wie die Entzüge ohne Kompostanwendung (Faktorkombination K0N2). Sie spiegeln damit das *standorttypische Entzugsniveau der Versuchsstandorte* wider.

⁵³ In eine vollständige Bilanz wären zusätzlich auch die Schwermetallzufuhren durch Handels- und Wirtschaftsdünger sowie durch die Staubimmission einzubeziehen. Die vorliegende Saldierung soll jedoch nur die *Relationen zur Kompostanwendung* beschreiben. Diese Zufuhren werden deshalb nicht berücksichtigt, weil sie von der Kompostanwendung unabhängig sind.

mit möglichst niedrigen Schwermetallgehalten eingesetzt werden. Der Anteil der Strohabfuhr trägt dabei nur bei den Schwermetallen Cd, Cu, Zn und Hg, das heißt nur bei höheren Relativanteilen an der Schwermetallzufuhr, messbar zur Senkung des Positivsaldos bei (vgl. Abbildung 32). Diese Anteile betrugen in den Versuchen im Mittel bei Zn 16 %, Cu und Hg 25 %, Cd 44 % des Gesamtentzuges.

Zusammenfassend ist einzuschätzen, dass ein Positivsaldo an Schwermetallen im Boden bei pflanzenbaulich optimalen Kompostgaben objektiv unvermeidlich ist, weil die geringen Schwermetallentzüge der Ernteprodukte die Schwermetallzufuhr grundsätzlich nicht kompensieren können. Möglichkeiten zur Senkung des Positivsaldos bestehen in der Anwendung von Komposten mit niedrigen Schwermetallgehalten bei moderaten Gaben unter jährlich 10 t/ha TM und zu entzugsstarken Fruchtfolgen (Mais, Zuckerrüben, Gemüsearten), mit denen höhere Schwermetallanteile abgefahren werden können. Damit kann eine mögliche Schwermetallanreicherung in Böden, die an sich schon in großen Zeiträumen abläuft (vgl. Punkt C 2.2.1.7), weiter hinausgezögert werden.

C 2.4 Düngewirksamkeit der Nährstoffzufuhren mit Kompostgaben

C 2.4.1 Stickstoff

Für die praktische Kompostanwendung ist es wichtig, möglichst exakt zu wissen, welcher *düngewirksame N-Anteil der N-Gesamtzufuhr* der Kompostgaben - im Mittel jährlich 80 - 110 kg/ha N (vgl. Punkt C 1.1.2.2 und Tabelle 19) - in der N-Düngebilanz anzurechnen ist. Diese düngewirksame N-Ausnutzung der Kompostgaben, d.h. ihre **N-Düngeeffizienz**, ergibt sich bei der gewählten Versuchskonzeption (vgl. Punkt B 3.2.2) aus der N-Bilanz, d.h. aus den N-Mehrentzügen der Ernteprodukte als Folge der Kompostanwendung. Die inzwischen langjährigen Ergebnisse der Kompost-Anwendungsversuche liefern dazu eine solide Grundlage, um die kurzfristigeren Resultate des DBU-Projektberichtes zur N-Düngeeffizienz (ANONYM 2003A) zu präzisieren.

Zur Methodik:

Die *N-Ausnutzung* relativ zur N-Zufuhr errechnet sich bei den einzelnen Kompoststufen K1, K2 bzw. K3 bei jeweils vergleichbarer mineralischer N-Ergänzungsdüngung (N-Stufen N0, N1 bzw. N2) wie folgt:

$$\text{N-Ausnutzung} \quad (\% \text{ N}_t\text{-Zufuhr Kompost}) = \frac{\text{N-Mehrentzug Ernteprodukt (kg/ha)} \times 100}{\text{N}_t\text{-Zufuhr (kg/ha)}}$$

Der *N-Mehrentzug* der Ernteprodukte wird bei den einzelnen Kompoststufen K1, K2 bzw. K3 wie folgt bestimmt:

$$\text{N-Mehrentzug} = \text{N-Entzug K-Stufen} - \text{N-Entzug K-Stufe K0 ohne Kompost}$$

Dieser Berechnungsansatz liefert, trotz bekannter Einschränkungen⁵⁴, *praktisch relevante* Ergebnisse, die in der Landwirtschaft unmittelbar angewendet werden können. Denn für die landwirtschaftliche Kom-

⁵⁴ Der Mehrentzug der Ernteprodukte gründet auf dem löslichen N-Pool im Boden, der sich als Summe der Mineralisierung bodenbürtiger N-Reserven (Humus) und der N-Zufuhr der Kompostgaben gebildet hat. Der Kompostanteil an diesem gesamten löslichen N-Pool und damit auch am N-Mehrentzug ist

postanwendung, die stets eine Kombination mit ergänzenden N-Düngergaben erfordert, zählt letztlich die summarische N-Düngeeffizienz dieser Kombination.

Die ermittelte **N-Ausnutzung bzw. Düngeeffizienz der mit den Kompostgaben zugeführten N_t -Mengen** fällt - wie auch schon in der kurzfristigeren Auswertungsperiode des DBU-Berichtes - im Mittel aller Versuche mit durchschnittlichen Werten von jährlich 5 – 10 % der N-Zufuhr relativ niedrig aus (vgl. Anhang 1, Tabellen 1-20 bis 6-20). Anhand der langjährigen Versuche lässt sich aber deutlicher als bisher zeigen, dass sich die N-Ausnutzung im Laufe fortgesetzter Kompostanwendung von anfänglich minimalen Werten deutlich unter 5 % der 1. Fruchtfolgerotation mittelfristig, d.h. nach der 2. – 4. Rotation auf höhere Werte um jährlich 5 – 15 % eingeepegelt hat (vgl. Abbildung 33). Ursache dafür ist die allmähliche Gleichgewichtseinstellung der N-Mineralisierung im Boden auf höherem Niveau nach länger andauernden Kompostgaben, auch unterstützt durch die allgemeine Förderung der Bodenfruchtbarkeit.

Die höchsten N-Ausnutzungsraten ergaben sich erwartungsgemäß bei fehlender N-Ergänzungsdüngung (N0), spiegeln sie doch die „reine“ N-Düngeeffizienz der Komposte wider, wie sie sich ohne jede zusätzliche N-Düngung und damit bei einem relativ niedrigen Ertragsniveau ergibt. Sie liegen in der 1. Fruchtfolgerotation um jährlich 5 %, allerdings mit weiten Spannweiten der Einzelversuche von -15 % - entsprechend einer zeitweiligen N-Immobilisierung - bis 10 %. Bei hohen Kompostgaben (10 bzw. 20 t/ha TM) bestand offenbar eine bessere N-Düngewirkung als bei geringen Gaben von 5 t/ha TM. Ab der 2. Rotation bis zur 4. Rotation sind im Mittel einheitliche N-Ausnutzungsraten von jährlich 8 - 15 % mit weiten Spannweiten der Einzelversuche von unter 5 % bis 25 % festzustellen, bei geringer Kompostgabe überwiegend höher als bei den höheren Gaben. Die Summe der Haupt- und Nebenernteprodukte zeigt - angesichts der erheblichen Streuung - mit 2 - 3 % nur unwesentlich höhere Werte als bei ausschließlichem Bezug auf die Haupternteprodukte.

Mit ergänzender N-Düngung, d.h. entsprechend den Bedingungen der realen Pflanzenproduktion, gehen die Ausnutzungsraten, bedingt durch den reichlicher zur Verfügung stehenden Stickstoff, leicht zurück:

Bei „halber“ N-Gabe (N1) in der 1. Fruchtfolgerotation auf jährlich 2 - 3 % im Mittel aller Orte, in der 2. - 4. Rotation auf etwa 5 - 12 %. Auch hier fallen die N-Ausnutzungsraten bei Bezug auf die Summe der Ernteentzüge nur gering höher aus als bezogen auf die Haupternteprodukte.

Auch mit einer vollen N-Ergänzungsdüngung (N2), d.h. in Kombination mit den Kompostgaben eine „N-Luxusversorgung“, sind im Durchschnitt der 2. - 4. Rotation noch mittlere messbare N-Ausnutzungsraten von jährlich 5 - 10 % zu verzeichnen, die in der 4. Rotation mit 8 - 13 % sogar noch höher ausfallen, Ausdruck für die unter diesen Bedingungen nach 10 - 12 Versuchsjahren noch gestiegene N-Düngeeffizienz. Allerdings zeigt die 1. Rotation (bis auf die niedrige Kompostgabe von 5 t/ha TM) kaum eine messbare N-Ausnutzung. Dies und auch die deutlich

mit der vorliegenden Versuchskonzeption nicht getrennt zu erfassen. Das wäre nur möglich mittels N^{15} -Dotierung des eingesetzten Kompostmaterials. Die ergänzende mineralische N-Düngung wird im Berechnungsansatz nicht berücksichtigt, da der N-Mehrentzug von Varianten mit bzw. ohne Kompost jeweils bei gleichem Niveau der mineralischen N-Düngung ermittelt wird, also im Bilanzvergleich = 0 ist. Tatsächlich ist aber mit Wechselwirkungen zwischen Mineralisierung der organischen Kompostsubstanz und der mineralischen N-Düngung zu rechnen, die hier nicht erfasst werden können. Für die vorgenommene Bilanzierung ist die vereinfachte Annahme „N-Mehrentzug in % der N_t -Zufuhr Kompost“ jedoch zulässig und zielführend.

geringeren Spannweiten der Einzelversuche ist auf die ausreichende N-Bereitstellung durch die hohe N₂-Gabe zurückzuführen, durch die auch negative Werte der N-Ausnutzung („N-Immobilisierung“) vermieden werden.

Die Versuche belegen auch, dass mit entzugsstarken Fruchtfolgen in der Tendenz höhere N-Ausnutzungsraten erreicht werden als mit entzugsschwächeren Fruchtfolgen. Beispielhaft zeigt das der Versuch Forchheim⁵⁵ mit K.Mais-Fruchtfolge im Vergleich zu den drei Versuchen mit S.Mais-Fruchtfolge (jeweils Mittel der 2. - 4. Rotation, vgl. Abbildung 34). Letztere nutzen die N-Zufuhr aus den Kompostgaben, bedingt durch den hohen N-Bedarf von S.Mais, im Mittel deutlich besser aus als die K.Mais-Fruchtfolge.

Besonders deutlich zeigt sich das bei fehlender N-Düngung (N₀): Die S.Maisversuche erreichten mittlere N-Ausnutzungsraten von 13 - 16 %, im Vergleich zu 7 - 10 % im Versuch Forchheim mit K.Mais. Auch bei „halber“ N-Gabe (N₁) lagen diese Raten mit 10 - 13 % bei den S.Maisversuchen noch über den Ergebnissen des Versuches Forchheim mit 4 - 7 %. Allerdings führte eine volle N-Ergänzungsdüngung (N₂) in Forchheim bei allen Kompoststufen zu höheren N-Ausnutzungsraten von 7 - 13 % im Vergleich zu den S.Maisversuchen mit 6 - 8 %, vermutlich bedingt durch die deutliche Ertragssteigerung bei K.Mais als Folge der hohen N-Gabe. Diese Ergebnisse geben allerdings *nur eine Tendenz* wieder, da ein vollgültiger Vergleich auf Grund der Bedingungen (Einzelstandort Forchheim - leichter Boden, Mittel von drei S.Maisstandorten - mittlere bis schwere Böden) nicht möglich ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Versuchs- und Auswertungskonzept der Kompost-Anwendungsversuche den Verhältnissen des praktischen Komposteinsatzes in der Landwirtschaft gut entspricht und objektive, belastbare Ergebnisse geliefert hat. Nach den „Regeln guter fachlicher Praxis“ wird Kompost in der Landwirtschaft wiederholt und in pflanzenbaulich zulässigen, d.h. mäßigen Gaben - und nicht in einmalig sehr hohen Mengen - eingesetzt. Für diese Bedingungen geben Richtwerte zur N-Ausnutzung, die über Fruchtfolgerotationen bzw. längere Anwendungszeiträume hinweg gewonnen worden sind, die realen Verhältnisse eindeutig realistischer wider als z.B. einmalige Ergebnisse, zumal wenn sie aus Versuchen mit überhöhten Kompostgaben abgeleitet wurden.

Die Ergebnisse erhärten die Einschätzung, die schon im DBU-Projektbericht (ANONYM 2003A) getroffen worden ist, dass beim Komposteinsatz insgesamt mit *nur mäßigen anrechenbaren Beiträgen zur N-Düngebilanz* zu rechnen ist. Das ergibt sich schon aus den - im Vergleich zu Phosphor und Kalium - relativ geringen löslichen N-Anteilen an den N-Gesamtgehalten der Komposte von im Mittel 3 - 5 % (vgl. Punkt C 1.1.1, Tabelle 18). Dass die N-Ausnutzung aus Komposten aber mittelfristig deutlich über diesen Werten liegt, ist ein Beleg für die *zunehmende N-Mineralisierung aus der organischen Kompostsubstanz*. Sie ist das Ergebnis des Zusammenwirkens mehrerer Faktoren, wie der Humusanreicherung und der zunehmenden mikrobiologischen Belebung des Bodens, die - zudem gefördert durch die ergänzende N-Düngung - das Mineralisierungsgleichgewicht allmählich in Richtung höherer löslicher N-Anteile verschiebt. Die langjährigen Versuche belegen recht klar, dass nach einer Anfangsphase, in der nach erstmaliger Kompostanwendung bis zu drei Jahren - wenn überhaupt - nur mit minimalen N-Mineralisierungsraten zu rechnen ist, das Gleichgewicht sich bei regelmäßiger Kompostanwendung

⁵⁵ Der Versuch Weierbach, gleichfalls mit K.Mais-Fruchtfolge, zeigte auf Grund einer geringeren, atypischen Kompostwirkung überwiegend niedrigere N-Ausnutzungsraten (vgl. Anhang 1, Tabelle 2-20) und wurde deshalb in den Vergleich nicht einbezogen.

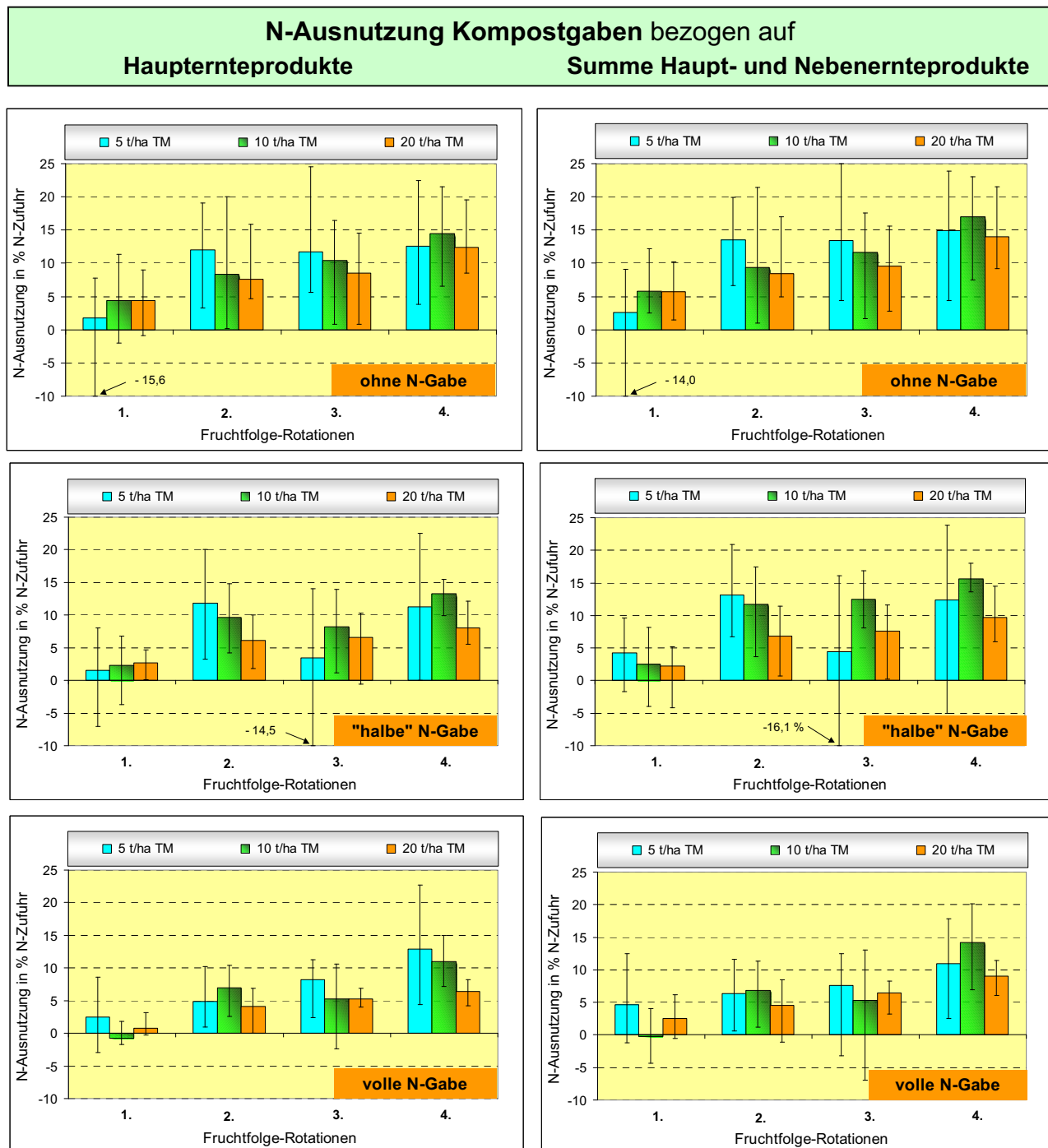


Abbildung 33 N-Ausnutzung der jährlichen Kompostgaben (N-Mehrentzüge Ernteprodukte in % der N-Zufuhr Komposte) im Verlauf der Fruchtfolgerotationen: Mittel aller Versuche (Fo, We, St, El, He), 4. Rotation nur Versuche Fo, We, St.

- Bezüge: a) N-Mehrentzüge im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost
 nur Haupternteprodukte (Korn bzw. S.Mais) → linke Seite
 Summe Haupt- und Nebenernte(Stroh)produkte → rechte Seite
 b) zusätzliche N-Ergänzungsdüngung
 ohne N (N0) - oben, „halbe“ N-Gabe (N1) - Mitte, volle N-Gabe (N2) - unten
- Legende: Balken → Mittelwerte Orte, Spannweiten → Minimum/ Maximum der einzelnen Orte + Jahre

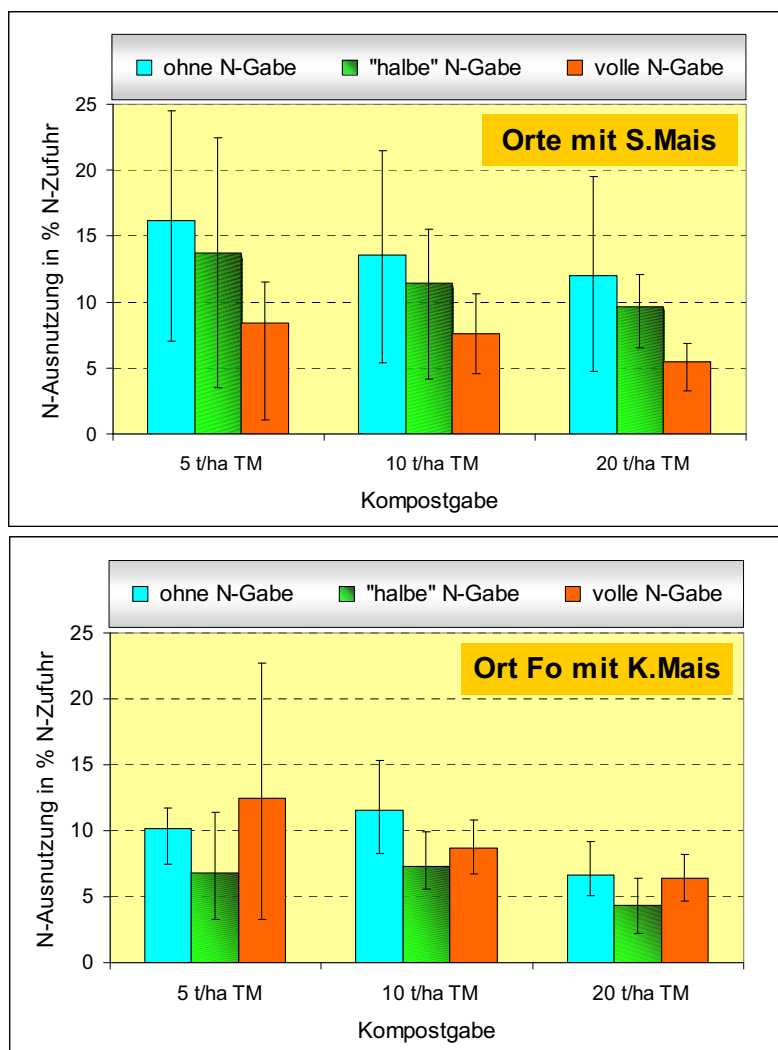


Abbildung 34 Vergleich der N-Ausnutzungsraten von K.Mais- bzw. S.Maisfruchtfolgen im Mittel der 2. - 4. Fruchtfolgerotation.

Bezogen auf N-Mehrentzüge der Haupternteerzeugnisse (Korn bzw. S.Mais) im Vergleich zur Kontrolle ohne Kompost.

Orte mit S.Mais: 2. und 3. Rotation - St, El, He, 4. Rotation - nur St

Ort mit K.Mais: Einzelversuch Forchheim

N-Ergänzungsdüngung: ohne N (N0), „halbe“ N-Gabe (N1), volle N-Gabe (N2)

Legende: Mittelwerte Orte → Balken, Spannweiten → Minimum/ Maximum der Orte + Jahre

schon nach der 2. Fruchtfolgerotation auf deutlich höherem Niveau einpegelt. Weitere Anstiege der löslichen N-Anteile sind nach bisherigem Stand des Wissens⁵⁶ wenig wahrscheinlich. Logisch und erklärbar ist auch, dass die N-Ausnutzungsraten bei ergänzender N-Düngung, bedingt durch die zunehmende Bereitstellung löslicher N-Anteile, niedriger ausfallen als ohne jede N-Düngung⁵⁷.

⁵⁶ In den Versuchen Forchheim, Weierbach und Stockach konnten dazu vier Fruchtfolgerotationen, d.h. ein Zeitraum von 12 Jahren regelmäßiger Kompostanwendung ausgewertet werden.

⁵⁷ Die Versuchsvariante „ohne N-Gabe“ (N0) war aus wissenschaftlichen Gründen einer vollständigen Kombination der in drei Stufen gestaffelten Faktoren „Kompostgabe“ und „N-Gabe“ notwendig. Für

Ausgehend davon sollten die **düngewirksamen N-Anteile der N-Gesamtzufuhr mit Kompostgaben** für praktische Verhältnisse einer *regulären N-Ergänzungsdüngung* wie folgt in der N-Düngebilanz angerechnet werden (vgl. Tabelle 35):

Kurzfristig, d.h. nach *erstmaliger* Kompostanwendung und für einen kurzen Zeitraum (bis zu drei Jahren) sind im Mittel jährlich maximal 3 % der N-Zufuhr düngewirksam anrechenbar. Diese geringe Rate heißt praktisch, dass die N-Ergänzungsdüngung nach „guter fachlicher Praxis“ ohne Abstriche zu geben ist. Unter günstigen Bedingungen (hohe lösliche N-Anteile im Kompost, hohe N-Entzüge) kann die N-Ausnutzungsraten jedoch bis auf jährlich 10 % ansteigen. Sie ist dann durch eine entsprechende Senkung der ergänzenden N-Düngung zu berücksichtigen. Ungünstige Bedingungen, mit denen z.B. bei holzreichen Grünkomposten, vor allem Frischkomposten, zu rechnen ist, können dagegen zu einer merklichen N-Immobilisierung führen, der durch entsprechende Zuschläge bei der N-Düngung zu begegnen ist.

Mittelfristig sind bei *regelmäßigem* Komposteinsatz ab dem 4. Jahr bis zum 12. Jahr (2. Fruchtfolgerotation und aufwärts) höhere N-Ausnutzungsraten von jährlich 5 - 12 % düngewirksam anrechenbar. Das heißt, im *3jährigen Turnus* werden *im Mittel etwa 20 - 35 % der N-Zufuhr einer Kompostgabe düngewirksam (!)*.

Tabelle 35 Abschätzung der düngewirksamen N-Anteile aus Komposten zur realistischen Anrechnung in der N-Düngebilanz.
 Gültig für Kompostgaben nach „guter fachlicher Praxis“ von 20 bis maximal 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus.

Jährliche N-Gesamtzufuhr ¹ absolut (kg/ha)		
	Mittel	90 - 130
	Spannweite	50 - 180
Jährlich anrechenbarer N-Anteil in der Düngebilanz (% N-Gesamtzufuhr) ²		
- kurzfristig (1 - 3 Jahre) nach erstmaliger Anwendung	Mittel	0 - 3
	Spannweite	-5 - 10
- mittelfristig (4 - 12 Jahre) nach mehrmaliger Anwendung	Mittel	5 - 12
	Spannweite	0 - 20

Anrechenbarer N-Anteil in der N-Düngebilanz (Erläuterung):

Unterer Wert:

- Komposte mit niedrigem löslichen N-Anteil (Regelfall Grünkomposte, Frischkomposte)
- Fruchtfolgen mit geringen/mittleren N-Entzügen (z.B. Getreidearten)

Oberer Wert:

- Komposte mit hohem löslichen N-Anteil (Regelfall Biokomposte, Fertigkomposte)
- Fruchtfolgen mit hohen N-Entzügen bzw. langer Vegetationszeit (z.B. S.Mais)

Anmerkungen in Anlehnung an Versuchsergebnisse:

¹ Hochrechnung gemäß Tabelle 17 (Ergebnisse der RAL-Gütesicherung der BGK e.V.)

² N-Ausnutzung Kompostversuche, vgl. Anh. 1, Tabellen 1-20 bis 6-20

Unter günstigen Voraussetzungen, z.B. bei entzugsstarken Fruchtarten wie S.Mais u.ä. und Komposten mit hohen N-Zufuhren und guter N-Verfügbarkeit (z.B. durchgerottete Biokomposte), sind noch höhere Raten von jährlich 15 - 20 % zu erwarten. Diese hohen jährlichen Raten sind auf jeden Fall in der N-Düngebilanz zu veranschlagen, d.h. die reguläre N-Düngung ist entsprechend zu reduzieren, damit keine überhöhten löslichen N-Anteile im Boden auftreten. In Fällen geringer N-Mineralisierung, also bei Grün- und Frischkomposten, sind jedoch nicht mehr als jährlich 5 % der N-Zufuhr anzurechnen, um eine unzureichende N-Versorgung der Pflanzen infolge einer möglichen N-Immobilisierung und im ungünstigen Fall dadurch bedingte Ertragseinbußen zu vermeiden.

Eine weitere Präzisierung der N-Düngung wird erreicht, wenn zusätzlich zur N-Ausnutzungsquote der Kompostgaben auch die mögliche **Anhebung der $N_{\min}$ -Gehalte im Boden als Folge der Kompostapplikation** quantitativ berücksichtigt wird. In der Regel erfolgt das bei der N-Düngungsplanung anhand von regional zusammengefassten oder speziell für den Standort ermittelten Messwerten des $N_{\min}$ -Gehaltes im Boden. Sind nur erstere vorhanden, sollte die ergänzende N-Düngung - ausgehend von den Versuchserfahrungen - im Mittel um 5 - 15 kg/ha, in Einzelfällen um bis zu 25 kg/ha reduziert werden (vgl. Punkt C 2.2.1.4).

C 2.4.2 Übrige Nährstoffe

Die **jährlichen Zufuhren der Nährstoffe Phosphor, Kalium und Magnesium** betragen mit pflanzenbaulich relevanten Kompostgaben von 20 bis maximal 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus im Mittel 35 - 55 kg/ha P_2O_5 , 55 - 85 kg/ha K_2O und 35 - 60 kg/ha MgO, mit beträchtlichen Abweichungen im Einzelfall (vgl. Tabelle 19 und Punkt C 1.1.2.2). In den Versuchen mit K.Mais-Fruchtfolge wurden diese Phosphorzufuhren annähernd eingehalten. In den S.Maisversuchen fielen sie jedoch höher aus. Die Kalium- und Magnesiumzufuhr war in allen Versuchen höher (vgl. Abbildung 11 und Punkt C 2.1.1.2).

Per Saldo ist die **Bilanz von Zufuhr und Entzug der Nährstoffe** - bezogen auf die Haupternteerzeugnisse - bei Phosphor im Mittel überwiegend ausgeglichen (vgl. Abbildung 7 und Punkt C 1.1.2.2). Bei Kalium ergeben sich häufiger Positivsalden, vor allem bei entzugsschwachen Fruchtfolgen. Entzugsstarke Fruchtfolgen gewährleisten in der Regel einen ausgeglichenen Saldo. Bei Magnesium verbleibt auf Grund der geringen Entzüge aller Fruchtarten stets ein erheblicher Positivsaldo (im Mittel das 3 - 5fache des Entzuges). Werden in die Bilanz auch die Nebenernteerzeugnisse (Stroh) einbezogen, ergeben sich nur bei Kalium auf Grund der merklichen Strohentzüge (in den Versuchen 40 - 50 % des Gesamtentzuges) Veränderungen in Richtung eines ausgeglichenen Saldos. Bei Phosphor bzw. Magnesium sind die Strohentzüge im Vergleich zu den Haupternteerzeugnissen in der Regel vernachlässigbar gering (in den Versuchen nur 10 - 15 % bzw. 20 - 25 % des Gesamtentzuges).

Die **Düngeeffizienz** der Zufuhren an Phosphor, Kalium und Magnesium mit den Kompostgaben dokumentiert sich am besten in der Nährstoffversorgung des Bodens, d.h. in ihrem *Einfluss auf die „pflanzenverfügbaren“ Bodengehalte dieser Nährstoffe*. Wie die langjährigen Versuche anschaulich gezeigt haben (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24), konnten die Ausgangsgehalte an Phosphor und Kalium zu Versuchsbeginn - trotz sehr hoher Ernteentzüge (Summe aus

Haupt- und Nebenernteprodukt) über die gesamte Versuchsperiode (!) - mit jährlichen Kompostgaben von 10 t/ha TM zuverlässig gehalten werden. Bei hohen Nährstoffzufuhren, wie in den S.Maisversuchen, waren sogar vermehrt Anhebungen der Gehalte festzustellen. Auch bei der niedrigen Kompostgabe von jährlich 5 t/ha TM blieben die „pflanzenverfügbaren“ Bodengehalte, trotz geringer Absenkungen, stets im ausreichenden Versorgungsbereich. Selbst die „pflanzenverfügbaren“ Magnesiumgehalte, die bis zum Versuchsjahr 2002 noch nicht auf die hohe Magnesiumzufuhr reagiert hatten (vgl. ANONYM 2003A), zeigten zum Versuchsende eine leicht ansteigende Tendenz (vgl. Abbildung 25).

Die Auswertung im DBU-Bericht bis zum Versuchsjahr 2002 hat gezeigt (vgl. ANONYM 2003A), dass bei Phosphor und Kalium zudem Ausschöpfungsraten der zugeführten Frachten durch Anhebung der „pflanzenverfügbaren“ Bodengehalte in Verbindung mit den Mehrentzügen der Ernteprodukte von insgesamt 40 - 60 % erreicht wurden. Diese hohen Raten bedeuten für die praktische Kompostanwendung, dass die Nährstoffzufuhr, auch im Interesse des vorsorgenden Bodenschutzes, in der **Düngebilanz eindeutig voll anzurechnen** ist. Auf eine erneute Auswertung der Ausnutzungsraten für Phosphor und Kalium nach Versuchsende wurde deshalb, auch aus Gründen der unstrittigen Verbesserung der Bodenversorgung mit diesen Nährstoffen, im vorliegenden Abschlussbericht verzichtet:

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die erheblichen Zufuhren an Phosphor und Kalium bei regelmäßigen Kompostgaben in pflanzenbaulich optimaler Höhe (20 - 30 t/ha TM im 3jährigen Turnus) eine **gute Düngeeffizienz** aufweisen, d.h. die Versorgung der Böden mit diesen essenziellen Nährstoffen stabil halten und sogar noch verbessern bzw. ein Absinken der pflanzenverfügbaren Gehalte verhindern. Damit haben sie den Wert einer Grund- bzw. Erhaltungsdüngung (**Einsparpotenzial**). Gleichzeitig bilden diese Zufuhren jedoch auch den begrenzenden Faktor der Kompostanwendung. Denn wenn die pflanzenverfügbaren Bodengehalte bis in hohe Versorgungsbereiche (Stufen D - hoch und E - sehr hoch) ansteigen, ist eine weitere Zufuhr nach den Vorgaben der Dünge-Verordnung nicht mehr zulässig. Damit ist vor allem bei deutlichen Positivsalen zu rechnen. Auch die Magnesiumversorgung des Bodens wird, wenn auch nicht in dem ausgeprägten Maße wie bei Kalium und Phosphor, mittelfristig positiv beeinflusst. Der hohe Positivsaldo ist unter verschiedenen Gesichtspunkten (wirkt der permanenten Mg-Auswaschung aus dem Boden entgegen, der lösliche Mg-Anteil im Boden erreicht keinesfalls phytotoxische Grenzen) durchaus als Vorteil einzustufen.

C 2.5 Ertragswirkungen

Die positiven Wirkungen der regelmäßigen Kompostanwendung auf den Ertrag, die schon im Rahmen des DBU-Projektes bis zum Versuchsjahr 2002 zunehmend festzustellen waren (vgl. ANONYM 2003A), haben sich im Laufe der langjährigen Versuchsdurchführung bis zum Versuchsabschluss 2006 weiter ausgeprägt. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass deutliche Schwankungen auftreten können, die auf verschiedene Faktoren, darunter vor allem die Jahreswitterung (in erster Linie die Niederschlagsentwicklung) und die Boden- und Standortbedingungen zurückzuführen sind. Die ermittelten Ertragsergebnisse (Einzeldaten vgl. Anhang 1, Tabellen 1-04 bis 6-04) werden unter Berücksichtigung dieser Faktoren grundsätzlich und bezogen auf allgemeingültige Tendenzen diskutiert.

Zur Verfahrensweise:

Die ertragsfördernde Wirkung der Kompostanwendung stellt sich - wie der Versuchsverlauf anschaulich zeigte - auf Grund der allmählichen Einstellung der Gleichgewichte im Boden erst mittelfristig ein, bei re-

regelmäßigen Kompostgaben in der 2. oder 3. Fruchtfolge-Rotation, d.h. nach etwa 3 - 6 Jahren. Ergebnisse kurzfristiger Versuchsanstellungen (bis zu 3 Jahren) sind deshalb wenig aussagekräftig.

Nachfolgend werden deshalb die *Absoluterträge* der Haupternteerzeugnisse (Mais: Maiskorn bzw. S.Mais, Getreidearten: Korn, jeweils in dt/ha TM GE⁵⁸) der letzten Fruchtfolgerotation 2004 - 2006 ausführlich vorgestellt und bewertet. Ergänzend erfolgt eine Betrachtung der *Relativerträge* der Haupternteerzeugnisse im Verlauf der Fruchtfolgerotationen 1998 - 2000, 2001 - 2003 und 2004 - 2006, mit der die Entwicklung der Erträge im Verlauf der regelmäßigen Kompostanwendung beurteilt wird.

Auf dem Versuch Weierbach war im gesamten Versuchsverlauf keine ertragssteigernde Wirkung der gestaffelten Kompostgaben festzustellen. Gründe dafür waren die hohen N-Reserven und das hohe Sorptions- und Pufferungsvermögen des Schlufflehm Bodens, die im Verlauf von 12 Jahren eine messbare Differenzierung der Varianten ohne bzw. mit Kompost verhindert haben. Die Ertragsergebnisse wurden deshalb in den komprimierten Bewertungen dieses Abschnittes nicht berücksichtigt.

Abbildung 35 zeigt oben die jährlichen *Absoluterträge* der letzten Fruchtfolgerotation 2004 - 2006 im Mittel aller Versuchsorte, in der Mitte die mittleren Erträge der drei S.Maisstandorte und unten - als Beispiel für Erträge einer K.Maisfruchtfolge auf leichtem Boden - die Ergebnisse des Standortes Forchheim, Abbildung 36 in gleicher Reihenfolge die *Relativerträge* der drei Fruchtfolgerotationen 1998 - 2000, 2001 - 2003 und 2004 - 2006.

Ohne zusätzliche N-Düngung (Stufe N0) fällt die Kompostwirkung erwartungsgemäß am höchsten aus. Gründe dafür sind - neben den „bodenverbessernden“ Kompostwirkungen - die deutliche N-Düngewirkung der Kompostgaben, weil - wie aus den Relativerträgen nach Abbildung 36 deutlich wird - der Ertrag der Kontrollvariante ohne Kompost und ohne N-Düngung (Variante 1) vor allem auf den S.Maisversuchen im Versuchsverlauf deutlich zurückging. Mit Kompostgaben von jährlich 10 t/ha TM wurde der Ertragsabfall im Vergleich zur Kontrollvariante ohne Kompost, aber „halber“ N-Gabe (Variante 2) fast kompensiert, die hohe Kompostgabe von jährlich 20 t/ha TM führte sogar zu höheren Erträgen als Variante 2.

Auch bei „halber“ **N-Ergänzungsdüngung** (Stufe N1) war noch eine deutliche Steigerung der Erträge durch die Kompostgaben im Vergleich zur Kontrollvariante ohne Kompost (Variante 2) zu verzeichnen. Gegen Ende der Versuche (2004 - 2006) wurde mit Kompostgaben von 10 - und deutlicher noch - von 20 t/ha TM das optimale Ertragsniveau der Standorte (Kontrollvariante 3 ohne Kompost, mit voller N-Düngung) erreicht und überschritten, auch hier ausgeprägt bei den S.Maisversuchen - ein klarer Hinweis darauf, dass bei langjähriger Kompostanwendung eine reduzierte N-Ergänzungsdüngung ausreicht, um optimale Erträge zu erzielen.

Selbst bei **voller N-Ergänzungsdüngung** (Stufe N2) waren noch leichte Ertragssteigerungen nach Kompostanwendung festzustellen, ausgeprägt gegen Ende der Versuche, obwohl das N-Düngungsoptimum nach „guter fachlicher Praxis“ offenkundig überschritten war. Diese Resultate belegen anschaulich die „Summenwirkung“ der Kompostgaben, die neben den zugeführten Nährstoffen vorrangig auf die bodenverbessernden Faktoren zurückzuführen ist, durch die die Bodenfruchtbarkeit insgesamt verbessert wurde.

Bei der Bewertung der Ertragsergebnisse sind allerdings Standortunterschiede zu berücksichtigen, um Fehlinterpretationen aus Mittelwerten zu vermeiden:

⁵⁸ GE - Getreideeinheiten für unterschiedliche Fruchtarten.
GE-Faktoren: Kornträge - 1,0, S.Maisträge - 0,6.

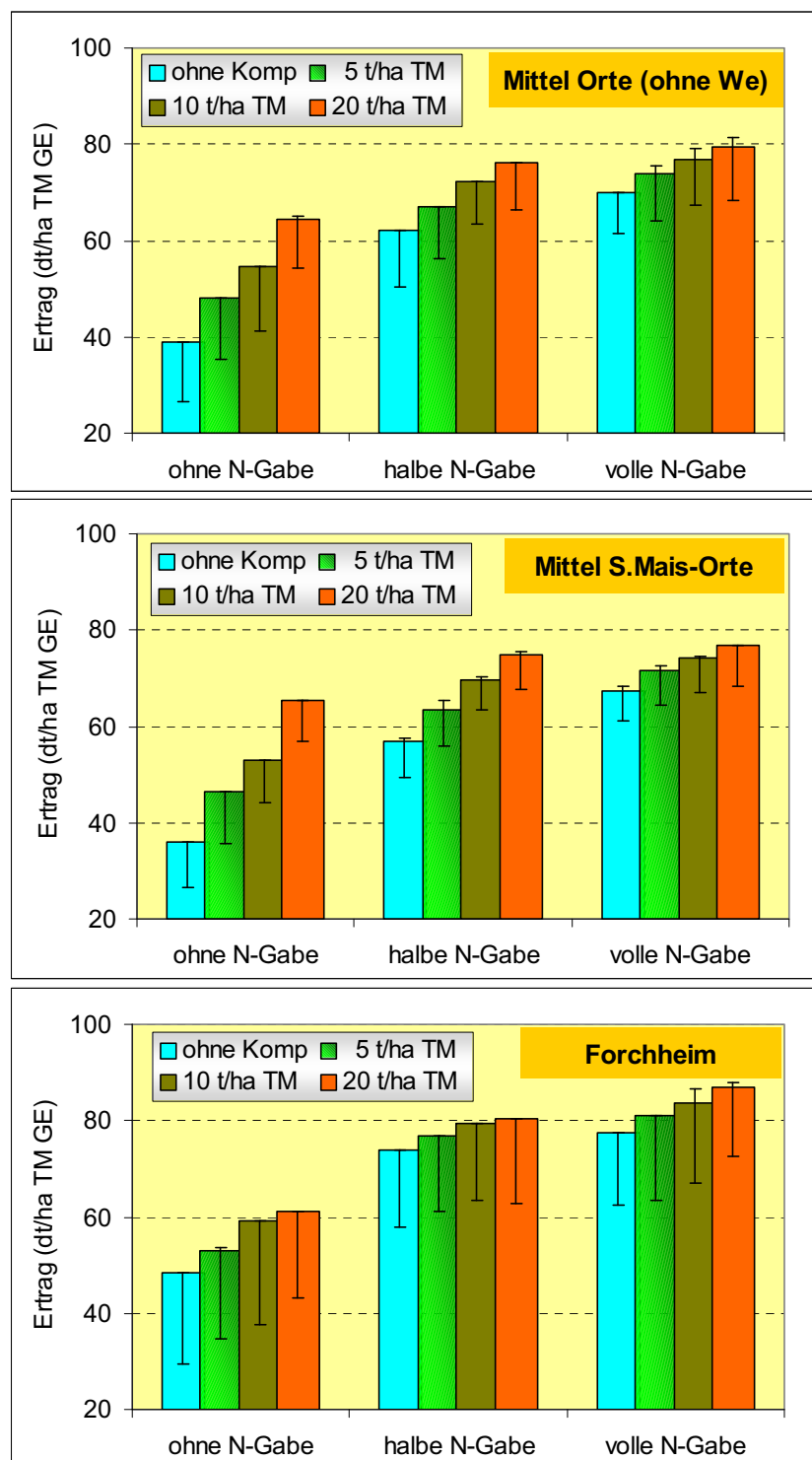


Abbildung 35 Erträge in Abhängigkeit von der Kompostgabe und der ergänzenden N-Düngung: Absolutwerte der letzten Fruchtfolge-Rotation 2004 - 2006

oben: Mittel aller Orte ohne Weierbach, d.h. Forchheim und S.Mais-Orte
Mitte: Mittel aller S.Mais-Orte (Stockach, Ellwangen und Heidenheim)
unten: Ort Forchheim mit K.Mais-Fruchtfolge

Legende: Balken → Mittelwerte Varianten, Spannweiten → 35. bis 65. Quantil der Einzelwerte Jahre bzw. Orte; Angabe nur untere Spannweite: obere Spannweite < Mittelwert, hier nicht angegeben

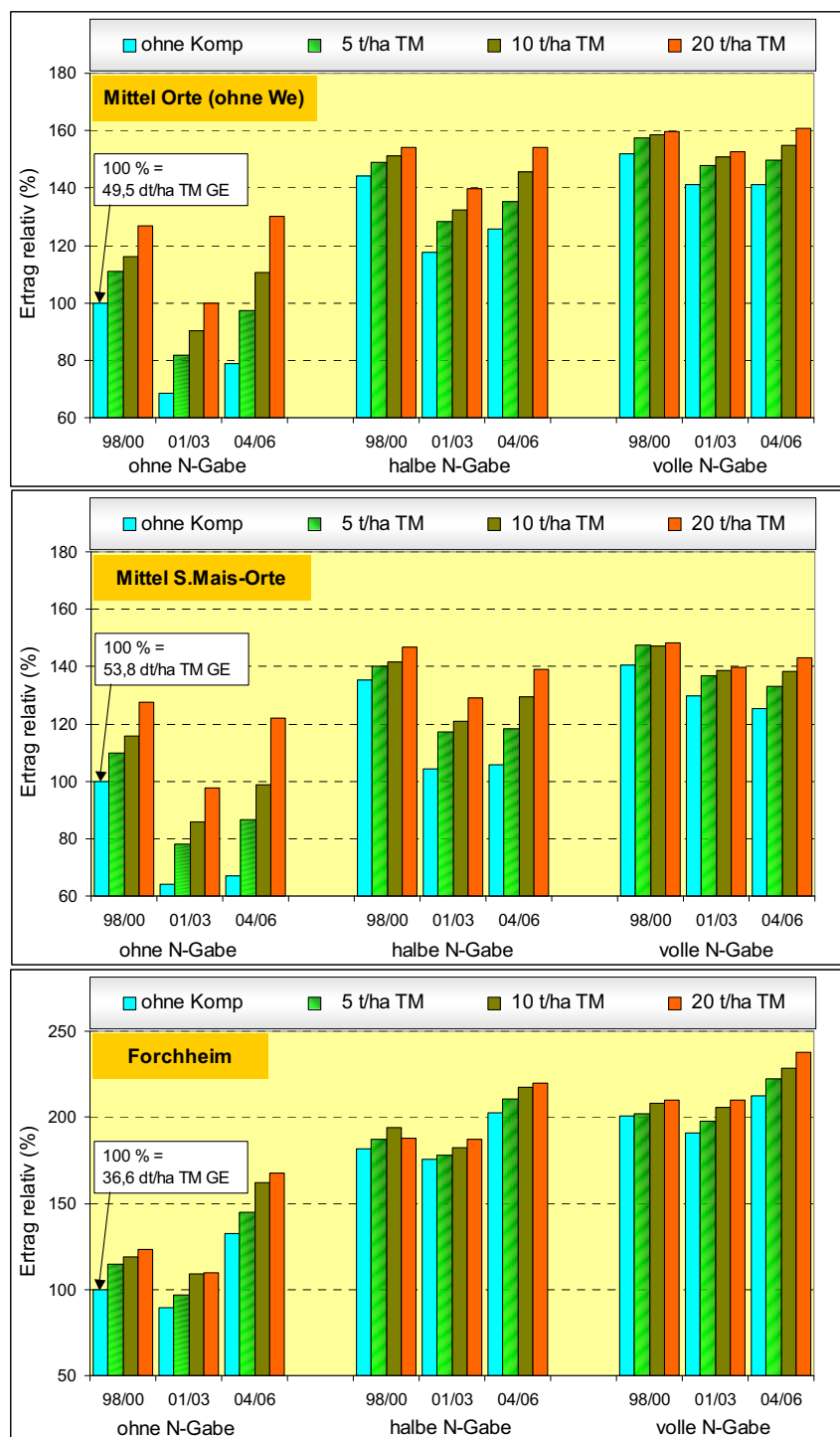


Abbildung 36 Entwicklung der Erträge in Abhängigkeit von der Kompostgabe und der ergänzenden N-Düngung:

Relativwerte der Fruchtfolge-Rotationen 1998-2000, 2001-2003 und 2004-2006

Legende: Variante 1 (ohne Kompost und ohne N-Gabe) der Rotation 1998-2000 = 100 % gesetzt
 Balken → Mittelwerte der Varianten einer Rotation
 Teilabbildungen unten, Mitte und oben → vgl. Legende Abbildung 35

Die **S.Maisversuche**, durchweg auf mittleren bzw. schweren Standorten angelegt, zeigten eine relativ ausgeprägte Kompostwirkung, sehr wahrscheinlich bedingt durch den hohen Humusbedarf der Fruchtart S.Mais. Ohne diese Zufuhren ging der Ertrag in den Kontrollvarianten ohne Kompost deutlich zurück, ausgeprägt bei Variante 1 (ohne N-Gabe). Umgekehrt reagierten die Fruchtfolgen deutlich positiv auf die Kompostzufuhr.

Der **Versuch Forchheim** kann als typisches Beispiel für die Kompostwirkungen in einer K.Maisfruchtfolge auf leichten Böden unter hohen Temperaturen und Bedingungen zeitweiligen Trockenstresses des Oberrheingrabens gewertet werden:

Die Erträge fallen ohne N-Gabe erwartungsgemäß auf niedrigere Relativwerte ab als bei ergänzender N-Düngung (Vergleich Varianten ohne Kompost N0, N1 und N2), weil auf dem leichten Boden keine nennenswerte N-Nachlieferung erfolgt. Die Kompostgaben bewirkten bei allen N-Düngungsniveaus merkliche Ertragssteigerungen, besonders deutlich in der letzten Rotation. All das sind Hinweise auf die ausgeprägte „Summenwirkung“ der Kompostanwendung, die unter diesen Anbaubedingungen sowohl in der N-Düngewirkung, wahrscheinlicher noch aber in den bodenverbessernden Wirkungen besteht. Vor allem die erhöhte Wasserspeicherung - bei Trockenstress besonders vorteilhaft - und die deutliche Verbesserung des Bodenlebens (vgl. Punkt C 2.2.2.2) dürften auf diesem sandigen Boden mit kiesigem Untergrund spürbar und mit zunehmender Anwendungsdauer verstärkt zur Stabilisierung und Anhebung der Erträge beigetragen haben.

Zusammenfassend belegen die inzwischen langjährigen Versuchsergebnisse, dass regelmäßige Kompostgaben die Erträge bei suboptimalen Bodenbedingungen nachweislich anheben können. Die Erträge nahmen in den Versuchen mit steigender Kompostgabe merklich zu, beginnend schon bei relativ geringen Kompostgaben von jährlich 5 t/ha TM, deutlicher bei höheren Gaben von 10 bzw. 20 t/ha TM. Im *pflanzenbaulich relevanten Bereich*, d.h. bei Kompostgaben von jährlich 5 - 10 t/ha TM (Stufen K1 und K2) und einer ergänzenden N-Düngung zwischen 50 und 100 % des Optimums (Stufen N1 und N2), wurden in den Versuchen gegen Ende des Versuchszeitraumes (2004 - 2006) Ertragssteigerungen von im Mittel 5 - 10 % erzielt, mit denen unter praktischen Verhältnissen bei regelmäßiger Kompostanwendung gerechnet werden kann.

Als maßgebende Faktoren des „Summeneffektes“ der Kompostanwendung auf den Ertrag - das zeigen die langjährigen Versuche - kommen in erster Linie die „bodenverbessernden“ Wirkungen (Struktur, Wasserhaushalt, Mikrobiologie) durch die Zufuhr an organischer Substanz, daneben aber auch die Düngewirkungen (vor allem P, K, Mg, Kalk) infrage. Prädestiniert für den Komposteinsatz sind mittlere bis schwere Böden mit suboptimalen Bodenbedingungen sowie leichte sandige Böden mit unzureichendem Wasserhaltevermögen. Hier zeigen sich die „bodenverbessernden“ Wirkungen am besten: allmähliche Optimierung von Bodeneigenschaften mit dem Ziel einer Ertragsstabilisierung, im günstigen Fall einer Anhebung des standorttypischen Ertragsniveaus. Für die monetäre Wertschätzung von Kompost durch den Landwirt ist dies nicht ohne Bedeutung, weil zu dem Wert der Pflanzennährstoffe, der basisch wirksamen Stoffe und der organischen Substanz der Wert des möglichen Zusatzertrages hinzukommt.

Zur Beachtung:

Die Ertragsergebnisse der Kompost-Anwendungsversuche widerspiegeln die *maximale Wirkung von Kompostgaben*, wie sie bei *Abfuhr aller Ernteprodukte*, d.h. neben den Haupternteprodukten Mais- und

C Ergebnisse

C 2 Kompostwirkungen in den Anwendungsversuchen

C 2.5 Ertragswirkungen

Getreidekorn bzw. S.Mais auch der Stroherträge, beobachtet werden kann. Die Bewertungen sind damit für Verhältnisse intensiver Pflanzenproduktion repräsentativ, in denen - wie in Regionen mit hoher Ackerbauproduktivität (z.B. Südwesten Baden-Württembergs, Köln-Aachener Bucht) zunehmend - der gesamte Aufwuchs (Haupternteprodukte plus Stroh) verstärkt außerhalb des landwirtschaftlichen Betriebes verwertet wird. Unter Bedingungen geringerer Produktionsintensität, unter denen Stroh in den Boden eingearbeitet wird (Ausgleich der Humusbilanz, Rückführung von Nährstoffen), ist zu erwarten, dass die hier festgestellten Ertragswirkungen des Komposteinsatzes weniger deutlich in Erscheinung treten.

D Literatur

- ANONYM (1999): Forschungsprojekt Baden-Württemberg PWAB 95 171 „Erarbeitung von Grundlagen für Anwendungsrichtlinien zur Verwertung geeigneter Rest- und Abfallstoffe im landwirtschaftlichen Pflanzenbau“, Bearbeiter: LUFA Augustenberg, Karlsruhe, und Institut für Bodenkunde und Standortslehre Hohenheim, Stuttgart. Abschlussbericht 1999, 276 S., 54 Abb. und 70 Tab. sowie Anhang.
- ANONYM (2003A): Verbund-Forschungsprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt Osnabrück (DBU) „Nachhaltige Kompostverwertung in der Landwirtschaft“, Bearbeiter: LUFA Augustenberg, Karlsruhe, Universität Hohenheim, Stuttgart, und Fachhochschule Nürtingen, Abschlussbericht 2003, 307 S., 75 Abb., 110 Tab., Anhang, Hrsg.: LUFA Augustenberg, Nesslerstrasse 23 - 31, 76227 Karlsruhe.
- ANONYM (2003B): Forschungsprojekt „Schadstoffe in klärschlammgedüngten Ackerböden Baden-Württembergs“, Abschlussbericht 2003, Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 107 S., 31 Tab., 27 Abb.
- ANONYM (2005): UBA-Projekt „Begrenzung von Schadstoffeinträgen bei Bewirtschaftungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bei Düngung und Abfallverwertung“, Projektbearbeitung: Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie, 57392 Schmallenberg, Abschlussbericht 2005 (UBA-Berichts-Nr. UBA-FB 001017), 232 S. 47 Tab., 109 Abb., Anhänge.
- BADEN-WÜRTTEMBERG (1994): Kompostierungserlass des Umweltministeriums Baden-Württemberg vom 30.06.1994, 10 S.
- BADEN-WÜRTTEMBERG (2001): Schutzgebiets- und Ausgleichs-Verordnung - SchALVO -. Novelle vom 20.02.2001. Gesetzblatt für Baden-Württemberg, Nr. 4, S. 145 - 182.
- BERGMANN; W. (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav-Fischer Verlag Jena und Stuttgart, 3. erweiterte Auflage, 835 S.
- BGK (2005): Organische Düngung. Grundlagen der guten fachlichen Praxis, aus der Reihe „Kompost für die Landwirtschaft“, Hrsg. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln, 2005, 27 S.
- BGK (2006): Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, 5. Auflage, 2006, Hrsg.: Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln.
- BGK (2007): Auswertung der RAL-Gütesicherung Komposte nach RAL-GZ 251 der Jahre 2004 und 2005 durch die BGK e.V., Köln, unveröffentlicht.
- BUNDESGESETZBLATT (1994): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG -) vom 27.09.1994. Bundesgesetzblatt 1994, Teil I, Nr. 66, S. 2705 - 2728.
- BUNDESGESETZBLATT (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfall-Verordnung

- BioAbfV -) vom 21.09.1998. Bundesgesetzblatt Jahrgang 1998, Teil I, Nr. 65, S. 2955 - 2981; Jahrgang 2001, S. 3379; Jahrgang 2002, S. 1488; Jahrgang 2003, S. 2373.
- BUNDESGESETZBLATT (2003): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsstoffen (Düngemittel-Verordnung - DüMV -) vom 26.11.2003, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2003, Teil I, Nr. 57, S. 2373 - 2437.
- BUNDESGESETZBLATT (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Dünge-Verordnung - DüV -) vom 27.02.2007, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2007, Teil I, Nr. 7, S. 222 - 240.
- GRISOT, C. (2002): Auswirkungen von Kompostgaben auf die Leistung der mikrobiellen Biozönose - Ergebnisse aus mehrjährigen Kompostversuchen -. Diplomarbeit. LUFA Augustenberg, Karlsruhe, und Universität Karlsruhe, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik (unveröffentlicht).
- GUEINZIUS, I. und THALMANN, A. (2003): Influence of organic fertilizers on *Fusarium spp* infestation of wheat - Some observations in field experiments on applying compost in agriculture - abridged version -. European Feed Microbiology Organisation (EFMO) Proceedings 2002; Speyer.
- KÖRSCHENS, M. et al. (2004): Standpunkt Humusbilanzierung, Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Bonn 2004.
- KÖRSCHENS, M. und SCHULZ, E. (1999): Die organische Bodensubstanz: Dynamik - Reproduktion - ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte. UFZ, Umweltforschungszentrum, Leipzig-Halle, 1999.
- VDLUFA (1996): Standpunkt des VDLUFA „Landbauliche Verwertung von geeigneten Abfällen als Sekundärrohstoffdünger, Bodenhilfsstoffe und Kultursubstrate“ vom 23.10.1996. Hrsg.: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten - VDLUFA -, c/o LUFA Speyer, Obere Langgasse 40, 67346 Speyer. 7 S.
- VDLUFA (2002): Stellungnahme des Verbandes Deutscher LUFA-Anstalten (VDLUFA) zur Konzeption von Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und Bundesministerium für Umweltschutz (BMU) „Gute Qualität und sichere Erträge“ vom Juni 2002, Hrsg.: VDLUFA, c/o LUFA Speyer, Obere Langgasse 40, 67346 Speyer, 24 S.
- WESSOLEK, G. et al (2004): Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG, Projektabschlussbericht, Umweltbundesamt, Dessau, 2004.

